

SUR L'UTILISATION DE CERTAINES SOLUTIONS MODERNES POUR LA CONSTRUCTION DES PALIERS DES SYSTEMES MOBILES DANS LES APPAREILS POUR LA MÉCANIQUE DE PRÉCISION

T. DEMIAN

La Polytechnique de Bucarest

Présenté par Prof. O. Petrik

Reçu le 28 novembre 1988

Abstract

The paper presents some fine mechanics bearing types, which are used in the last years. Some of these solutions are suited and advantageous only for small dimensions. The presented achievements are: lobate hydrodynamic gas bearings, flexible band bearings, spiral grooved bearings, ferrofluid bearings, capillary ring shape bearings, guides and bearings with porous parts. For all these systems, the calculation simplifying hypotheses are given and the correspondences between the author's experimental determinations and the results of the proposed method of calculation are shown.

Dans mon exposé, je me rapporterai en détail aux solutions des *paliers pour les appareils lubrifiés aux gaz* et particulièrement à l'air. Malgré les difficultés dues aux petites dimensions, les avantages offerts par ces adossements ne peuvent pas éliminer les appareils pour la mécanique de précision.

Les paliers aux gaz représentent actuellement une solution constructive typique pour l'appui des parties mobiles des appareils. Les paliers gazodynamiques sont compétitifs dans le domaine des gyroscopes et de l'appareillage médical où ils réalisent des constructions simples et fiables. Les paliers gazostatiques sont appliqués de plus en plus comme des éléments d'appui pour les systèmes mobiles des tables rotatives, des machines et des appareils pour mesure de dimensions et d'autres appareils auxquels on assure une précision élevée de fonctionnement.

Pour chaque type de palier, pour chaque solution constructive surgissent dans le calcul de projection des problèmes qui ne peuvent être solutionnés que par un calcul laborieux en employant le calculateur comme aide principale.

Pour les *paliers gazodynamiques* des appareils qui fonctionnent à une vitesse élevée, comme par exemple les gyroscopes, un problème important pose l'assurance d'un fonctionnement stable.

Parmi les solutions utilisées avec succès on compte aussi la réalisation de lobes sur coussinet, figure 1.

Ce type de paliers présente l'avantage d'une technologie simple d'exécution aux dimensions relativement réduites des pièces (diamètres de 12...24 mm). La profondeur des lobes est de (5...10 μm) et les jeux radiaux sont de (2,5...5 μm). Quand les lobes sont exécutés sur le coussinet (donc sur une partie du palier), la distribution des

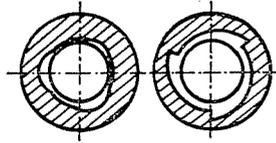


Fig. 1. Le palier avec coussinet lobé

pressions est donnée par l'équation de Reynolds:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(H^3 \delta \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(H^3 \delta \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \Lambda \frac{\partial(pH)}{\partial(\theta)}$$

où l'hauteur H de l'interstice aura la forme:

$$H = (1 + \varepsilon \cos \theta) + \Delta(\theta)$$

où $\Delta(\theta)$ représente l'interstice doué aux lobes.

Si la direction du chargement est variable (le cas de l'appareillage gyroscopique monté sur le véhicule), une variation des performances du palier avec la position n'est pas acceptable. La solution est donnée par la réalisation des lobes sur la partie mobile. C'est le cas où surgissent des difficultés de calcul parce que H depend aussi du temps,

$$H = (1 + \varepsilon \cos \theta) + \Delta(\theta', t)$$

et la pression dans un point de l'interstice oscille avec une fréquence égale à la fréquence de rotation du palier.

Donc, quand on traite le problème on doit suivre toutes les deux situations avec le coussinet fixe et le coussinet rotatif et vice-versa. On a proposé un traitement analytique-numérique du problème, en analysant les performances statiques et les conditions de stabilité du palier.

On peut réaliser une vérification des conclusions obtenues sur cette voie par simulation sur le calculateur de la réponse dynamique du palier à une perturbation extérieure en suivant le trajet au centre du rotor. Si le centre du tourillon tend vers un point qui correspond à la position du régime statique de fonctionnement, le rotor a un comportement stable (figure 2).

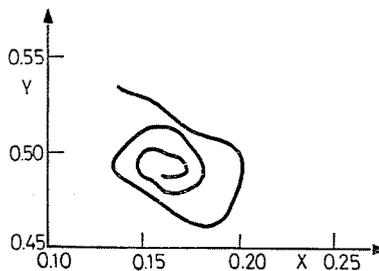


Fig. 2. La trajectoire du centre du rotor pour un comportement stable

Sur le stand d'un modèle pratique de rotor on a effectué des mesures qui ont confirmé les conclusions théoriques obtenues par calcul.

Pour les *paliers gazostatiques* employés comme support pour les parties mobiles des appareils, on intéresse aussi la rigidité envers un moment de renversement, grandeur pour laquelle dans la littérature de spécialité il y a peu de données contrètes. La rigidité envers un moment de renversement est définie comme une valeur négative de la dérivée du moment de renversement par rapport à l'angle d'inclinaison de la plaque,

$$K_d = -\frac{dM}{d\alpha}$$

Le champ de pressions p est déterminé par l'équation de Reynolds et le moment de renversement est calculé comme:

$$M = \iint r(p - p_0) dx dy$$

présenté sans dimensions comme dans la relation:

$$\bar{M} = \frac{M}{L^3(p_s - p_0)}$$

où p_s est la pression d'alimentation et L est une longueur caractéristique pour l'élément du palier.

Pour déterminer cette grandeur pour une série vaste de configurations, on a fait des calculs numériques, en utilisant la méthode des différences finies et en présentant les résultats du point de vue graphique, forme très accessible pour celui qui effectue des projets techniques, comme dans l'exemple illustré dans la figure 3.

Pour les paliers axiaux circulaires, alimentés par orifices, on a pu analyser l'influence de la position de la source d'alimentation sur la distribution des pressions et

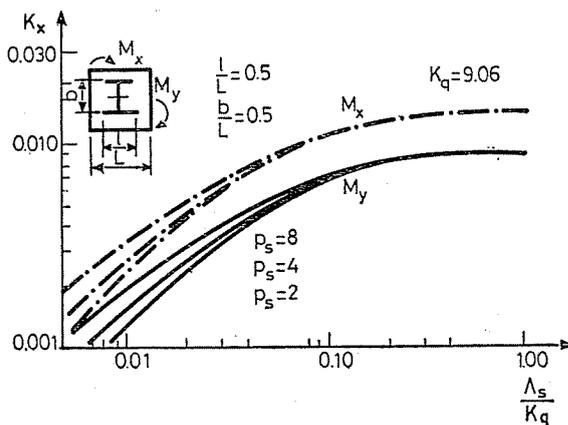


Fig. 3. Le moment de renversement pour une configuration de patine gazostatique

implicitement des performances du palier. Un exemple est présenté en figure 4, où \bar{W} est la capacité de chargement exprimée sans dimensions et \bar{Q} est le débit du fluide consommé par le palier exprimé aussi sans dimensions.

Pour une géométrie d'alimentation déterminée (le paramètre $A_s = \frac{6\eta r_0^3 \sqrt{RT}}{p_s \cdot h^3} =$ = constant), la position optimale des sources (rayon r_0) dépend du critère optimal choisi (portance maximale ou débit minimum) et aussi du nombre d'orifices d'alimentation.

Les résultats prouvent la possibilité d'une optimisation du positionnement de ces orifices en fonction de différents critères (figure 4), [1].

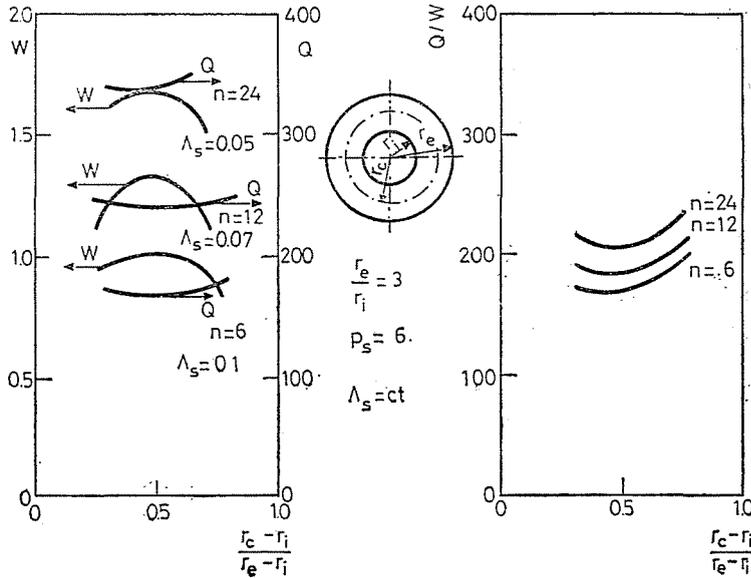


Fig. 4. La position optimale des sources pour les paliers axiaux circulaires

Ces résultats mettent en évidence le champ vaste d'applications de la portance sur gaz pour les systèmes mobiles des appareils, de la mécanique de précision et les problèmes qui doivent être solutionnés en respectant les particularités d'emploi.

Comme solution constructive particulière pour les paliers gazodynamiques autoportants, on considère l'utilisation d'un *coussinet flexible*, réalisé le plus souvent d'une bande flexible qui contourne l'élément fixe. L'interstice entre les éléments mobiles est formé automatiquement grâce à l'élasticité de la bande, à la suite de l'action des pressions produites pendant le fonctionnement de l'effet hydrodynamique.

La bande peut être simple (figure 5, a), ou plus complexe, ce qui permet un contrôle plus ample sur son élasticité (figure 5, b). On rencontre la configuration de principe de la fig. 5, a aussi dans le cas de la séparation aux distances sousmicro-métriques de la bande magnétique et de la tête de lecture et d'enregistrement des

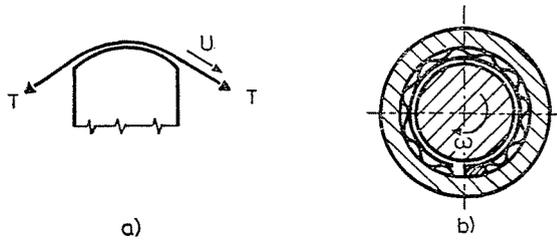


Fig. 5. Palier à bande flexible

unités de mémoire à bande magnétique et des vidéomagnétophones. Les coussinets à bande flexible offrent pour toute une série d'applications (turbocirculatoires ou centrifugeuses), à côté d'une manière constructive simple, un comportement dynamique plus stable, ce qui s'avère particulièrement important, car l'instabilité hydrodynamique constitue la principale difficulté pour l'utilisation des paliers gazodynamiques dans les systèmes à grand nombre de tours.

Les hypothèses usuelles de calcul, simplifiées, considèrent une feuille d'une largeur théoriquement infinie (donc un mouvement unidirectionnel du fluide), parfaitement flexible (sans rigidité au courbement) et un comportement incompressible du fluide. La distribution des pressions est donnée par l'équation de Reynolds:

$$\frac{d}{d\theta} \left(h^3 \frac{dp}{d\theta} \right) = 6\eta U r_0 \frac{dh}{d\theta}.$$

L'épaisseur de l'interstice $h = r - r_0$ est liée à la tension T de la bande et aux pressions par l'équation d'équilibre:

$$p - p_0 = \frac{T}{R}.$$

Le rayon de courbure de la bande, R , a l'expression:

$$R = \frac{\left[\left(\frac{dr}{d\theta} \right)^2 + r^2 \right]^{3/2}}{2 \left(\frac{dr}{d\theta} \right)^2 - r \frac{d^2 r}{d\theta^2} + r^2}$$

où r et θ représentent les coordonnées polaires d'un point courant sur la bande. Les autres notations ont les significations suivantes:

η — la viscosité dynamique du fluide;

U — la vitesse relative;

p_0 — la pression ambiante.

Les déterminations expérimentales [2] ont pleinement confirmé la possibilité de l'utilisation d'une feuille flexible pour palier radial à frottement fluide. Sa construction peut être considérée simple et accessible, en éliminant les traitements coûteux imposés au palier radial classique à coussinet massif.

Le principal problème posé par ce type de palier réside dans la feuille flexible et le matériel de celle-ci, pour lequel, dans les conditions des applications industrielles, des propriétés mécaniques fort bonnes s'imposent. Le Mylar a prouvé une grande résistance pendant les essais effectués, mais, pour les conditions d'exploitation plus dures c'est l'utilisation des feuilles métalliques qui s'impose.

L'une des solutions les plus intéressantes utilisées pour l'assurance du fonctionnement en régime de frottement fluide avec l'obtention de la portance par l'effet hydrodynamique est constituée par les *paliers à conduits hélicoïdaux*. La construction classique d'un rotor gyroscopique, celle sous la forme d'une «bobine», présentée en figure 6, implique l'utilisation, à côté du palier radial autoportant, des deux paliers axiaux planes qui doivent assurer le positionnement exact de l'élément mobile. Dans ce cas, la solution constructive la plus efficace pour l'obtention du régime de frottement fluide est le palier plan à conduits hélicoïdaux, dont la portance créée par l'effet échelon du conduit est agrandie par le pompage dû à la disposition des conduits selon une spirale (figure 6).

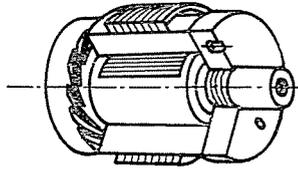


Fig. 6. Gyromoteur aux paliers gazodynamiques

La diversité constructive de ce type de palier est extrêmement grande, étant établie par le type de pompage adopté — intérieur ou extérieur, comme l'on vient de montré en figure 7, ainsi que par la géométrie des conduits, en impliquant leur forme, profondeur et largeur.

Pour imprimer un degré de généralité à cette solution, on introduit les suivants paramètres adimensionnels dont les notations sont celles de la figure 7:

$$H = \frac{h_1}{h_2}; \quad \gamma = \frac{a_1}{a_2}; \quad \lambda = \frac{R_i}{R_e}; \quad \lambda_0 = \frac{R_0 - R_i}{R_e - R_i}$$

et qui caractériseront avec l'angle α la géométrie du palier et:

$$\Lambda = \frac{6\eta\omega(R_e^2 - R_i^2)}{p_0 h_2^2}$$

qui caractérisera le fonctionnement du palier.

L'étude et le calcul du palier ont pour point de départ l'analyse de l'écoulement de fluide dans l'interstice, donnée par les équations générales de mouvement des

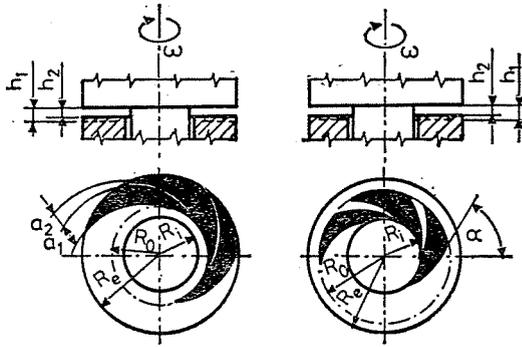


Fig. 7. Des types constructifs de paliers axiaux plans à conduits hélicoïdaux

fluides visqueux, particularisées pour les valeurs bien petites de la largeur de l'interstice par rapport aux autres dimensions.

On peut obtenir une simplification du calcul par la considération d'une fonction continue pour la distribution des pressions dans le palier après avoir fait un bobinage du profil réel, ce qui correspond à la supposition de l'existence d'un nombre infini de conduits sur la surface du palier. De cette manière, l'équation différentielle qui décrit la variation de la pression dans le palier, écrite adimensionnellement devient:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{R \partial} \left[RP \left(f_r \cdot \frac{\partial P}{\partial R} - A \cdot f_s \cdot \cos \alpha \cdot R \right) \right] = \emptyset$$

où l'on a noté que $P=p/p_0$, $R=r/r_e$ et f_r, f_s sont des fonctions analytiques dépendantes de paramètres géométriques du palier.

La solution de cette équation et l'intégration des pressions sur la surface du palier vont donner la portance du palier sous la forme:

$$W_z = \frac{F_z}{p_0 \pi (R_e^2 - R_i^2)} = W_z(\alpha, \lambda, \lambda_0, H, \gamma, A)$$

L'obtention sur voie numérique de la valeur de l'expression de la portance permet l'étude de l'influence de différents paramètres sur les performances du palier.

Le premier problème d'intérêt est la forme de la courbe qui établit le profil des conduits; un fait ayant des implications technologiques directes. On a présenté en figure 8, d'une manière comparative, les résultats concernant la portance pour un palier à pompage intérieur, pour quelques types de courbes. Ensuite, on peut établir aussi les valeurs optimales des paramètres qui définissent la géométrie du palier [3].

À cause de raisons d'ordre technologique, surtout pour les petites dimensions, le nombre des conduits ne peut être trop grand, les valeurs usuelles étant 6...24. La solution du problème, considérant le nombre fini de conduits, suppose la résolu-

tion de l'équation de Reynolds, qui, en coordonnées polaires, devient :

$$\frac{\partial}{\partial R} \left(PH_i^3 \frac{\partial P}{\partial R} \right) + PH_i^3 \frac{1}{R} \frac{\partial P}{\partial R} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(PH_i^3 \cdot \frac{1}{R} \frac{\partial P}{\partial R} \right) = \Lambda \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} (PH)$$

où $H_i = H$ dans la zone de vide des conduits

$H_i = 1$ dans la zone de plein.

On peut résoudre cette équation par la méthode des différences finies, utilisant un calculateur qui permet la prise en considération d'un nombre suffisant de points pour la discrétisation de l'équation.

L'analyse théorique, analytique et numérique permet un calcul efficace des paliers plats à conduits hélicoïdaux pour l'étude de l'influence de différents paramètres sur ses performances. Mais la méthode numérique de calcul, plus rigoureuse, est prohibitive par le temps de calculateur nécessaire, ainsi que l'optimisation de la géométrie du palier et l'élaboration des diagrammes qui de cette manière est applicable seulement dans les cas concrets, bien justifiés. Les résultats analytiques-numériques, plus approximatifs, restent toujours d'un réel intérêt pour le calculateur du projet.

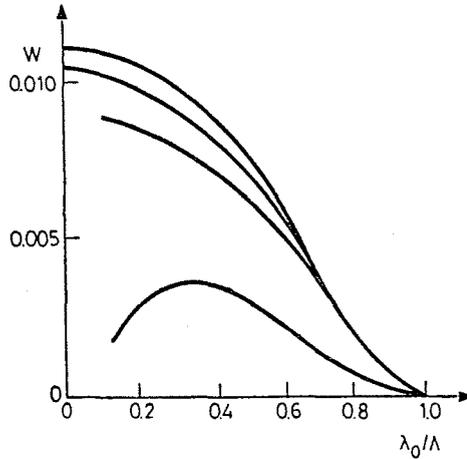


Fig. 8. L'influence de la courbe qui établit la forme des cannelures sur la portance du palier

Des perspectives nouvelles dans les problèmes liés à la technique de la lubrification dans le domaine de la mécanique de précision ouvrent les *ferro-fluides*, autant par la possibilité de leur conservation sur le point de lubrification, en réduisant les pertes de lubrifiant, que grâce au fait que la viscosité des ferro-lubrifiants est un paramètre contrôlable du point de vue magnétique ou électro-magnétique.

Du point de vue du calcul, les paliers ferro-fluido-dynamiques posent les mêmes problèmes que ceux des hydrodynamiques. Les équations approximatives de mouvement, l'équation de la continuité et celle des pressions ont la même forme pour les pellicules ferro-lubrifiantes que pour celles des lubrifiants; les différences, pour les premières, étant dues à leurs propriétés magnétiques.

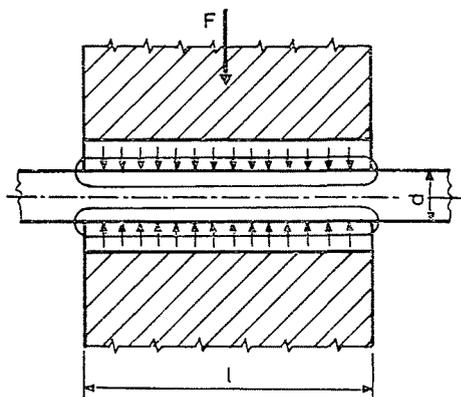


Fig. 9. La distribution du champ magnétique dans la zone de l'entrefer, créée par une pièce polaire et un tourillon dans la présence du ferro-fluide

Pour l'estimation de la portance dans le palier à ferro-fluide, pour la zone de contact entre une pièce polaire et le tourillon, on accepte une distribution des pressions dans le ferro-fluide, comme montré en figure 9 et en résulte:

$$p_2 - p_1 = \mu_0 \int_0^H M(H, T_i) dH$$

et $p_2 = p_3$, donc:

$$p_4 - p_3 = -\mu_0 \int_0^H M(H, T_f) dH.$$

et par conséquent,

$$\Delta p = p_4 - p_1 = \mu_0 \left[\int_0^H M(H, T_i) dH - \int_0^H M(H, T_f) dH \right]$$

où: p_1, p_2, p_3 et p_4 sont les pressions statiques dans le ferrofluide; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m$ — la perméabilité, M — l'aimantation; T_i et T_f — la température à l'entrée, respectivement à la sortie sur la cheville, H — l'intensité du champ magnétique.

Si le ferro-fluide est saturé du point de vue magnétique l'équation devient:

$$\Delta p = \mu_0 H(M_2 - M_1) = \mu H M_s$$

où M_s est l'aimantation de saturation du ferro-fluide.

Assimilant cette pression à la pression moyenne p_m sur le palier, on peut déterminer théoriquement la charge extérieure F , applicable sur le palier:

$$F = \Delta p \cdot d \cdot l$$

où d et l sont les paramètres géométriques du palier [4].

Tenant compte de leurs avantages — une meilleure portance et une lubrification sûre — on peut utiliser les paliers à ferro-fluides dans les constructions d'appareils

et d'équipements de mécanique des précision. Leur domaine d'emploi est limité par leur plus grand gabarit et par la nécessité d'une source d'alimentation à courant électrique, au cas d'un palier à électro-aimant. Par surcroît, le moment de frottement est 3—4 fois plus grand que la lubrification hydrodynamique et varie selon le nombre de tours de la génératrice. En mesurant les valeurs du projet convenables en ce qui concerne la forme des pièces polaires et des portées des arbres de glissement, on peut aussi prélever les forces axiales et, simultanément, on peut assurer un étanchement pratiquement dépourvu d'usure.

Dans la construction des appareils de grande sensibilité, on peut réaliser l'adossement de leur partie mobile qui, dans la plupart des cas, fait corps commun avec l'élément indicateur, par des paliers dont la portance est fondée sur la tension superficielle des liquides, comme, par exemple, *les paliers capillaires à anneau circulaire*.

En considérant un anneau circulaire emplanté dans un tube cylindrique où se trouve un liquide qui arrose le paroi (fig. 10), l'anneau sera centré à l'intérieur du tube par les forces capillaires.

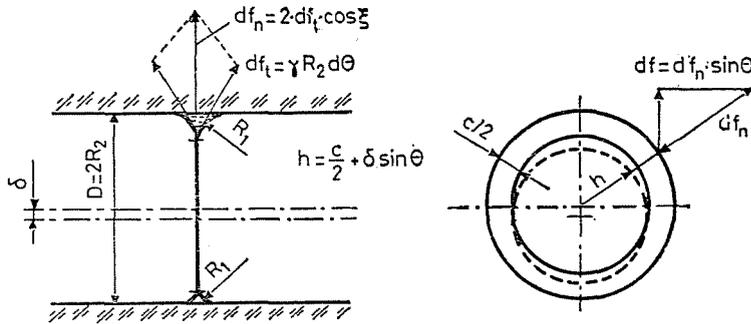


Fig. 10

Selon l'équation de Laplace, la différence entre la pression à l'intérieur du liquide p_i et la pression extérieure p_e est:

$$p_i - p_e = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

où γ est la tension superficielle du liquide, et R_1 , R_2 sont les rayons de courbure principale, ayant le sens «+» si le centre se trouve à l'intérieur du liquide et le sens «-» si le centre se trouve à l'extérieur de celui-ci.

En supposant que le liquide arrose parfaitement le paroi ainsi que l'angle de contact devient zéro, et le jeu c entre l'anneau et le tube est beaucoup plus diminué que le diamètre du tube, on peut noter la superficie d'une section transversale à travers la pellicule du liquide, dépendent du rayon du ménisque R_1 et de l'excentricité de

l'anneau δ :

$$A(R_1, \theta, \delta) = \left(\frac{c}{2} + R_1 - \delta \sin \theta \right) \sqrt{ \left[2R_1 \left(\frac{c}{2} - \delta \sin \theta \right) - \left(\frac{c}{2} - \delta \sin \theta \right)^2 \right] } - R_1^2 \cdot \arccos \left[R_1 - \left(\frac{c}{2} - \delta \sin \theta \right) / R_1 \right].$$

On obtient le volume du liquide entre l'anneau et le tube par la relation:

$$V(R_1, \delta) = \int_0^{2\pi} A R_2 d\theta$$

qu'on calcule numériquement.

Dans la position horizontale de fonctionnement, lorsque l'action des forces de gravitation influencent la configuration de la pellicule, le rayon du ménisque sera modifié, en dépendant non seulement du volume du liquide mais aussi de l'angle courant θ . La pression du liquide dépendent seulement du volume de liquide sera:

$$p_{\text{vol}} = -\gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

et les pressions hydrostatiques supplémentaires dues à la position horizontale ont la distribution donnée par la relation:

$$p_{\text{grav}} = -(\rho g R_2) (1 + \sin \theta)$$

La résultante des pressions sera:

$$p_{\text{tot}} = p_{\text{grav}} + p_{\text{vol}} = -\gamma \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_2} \right)$$

d'où provient le rayon modifié du ménisque:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} \rho g R_2 (1 + \sin \theta)$$

La force normale qui agit sur un élément de la circonférence de l'anneau est donnée par la relation:

$$dF = 2 \cos \xi \cdot \gamma \cdot R_2 d\theta$$

où

$$\cos \xi = \frac{1}{R} \sqrt{ 2R \left(\frac{c}{2} - \delta \sin \theta \right) - \left(\frac{c}{2} - \delta \cos \theta \right)^2 }$$

On calcule la force portante résultante par l'intégrale:

$$F = \int_0^{2\pi} 2 \cos \xi \cdot \gamma \cdot R_2 \cdot \sin \theta d\theta = D \cdot \gamma \cdot \int_0^{2\pi} \cos \xi \cdot \sin \theta d\theta$$

aussi par un moyen numérique.

En analysant les données obtenues théoriquement [5], il en résulte, qu'en position verticale, la rigidité du même palier est plus grande qu'en position horizontale.

Pour des déplacements radiaux modérés, la rigidité est pratiquement constante et la caractéristique du palier étant linéaire, le volume de liquide en influence la portance et la rigidité, en existant une valeur pour laquelle les deux grandeurs sont au maximum. Plus le jeu est diminué, la variation des performances en fonction de la position de fonctionnement est plus encore négligeable.

Enfin, une solution de réaliser des paliers gazostatiques, afin d'être utilisés dans la mécanique de précision, serait la construction à l'aide d'un *élément poreux d'alimentation*.

Les difficultés de calcul sont liées, surtout, à la circulation du lubrifiant à l'intérieur du matériel poreux. L'équation de déplacement se produit selon la loi d'Arcy:

$$\frac{\partial p}{\partial w} = - \frac{\eta \cdot U_w}{K_p}$$

où p est la pression; w — la direction du déplacement; U_w — la vitesse du liquide sur la direction w et K_p — un coefficient de perméabilité. On va noter l'équation de Reynolds sous la forme:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial p^2}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h^3 \frac{\partial p^2}{\partial y} \right) = -12 \frac{K_p}{\delta} (p_{a1}^2 - p^2)$$

sachant que, surtout dans ce cas, le lubrifiant comporte une valeur normale de la vitesse.

En considérant le type de palier représenté dans la fig. 11, l'expression du débit qui traverse la surface poreuse, pour un écoulement unidirectionnel [6], est:

$$G = \frac{K_p}{2\eta} \cdot \frac{1}{RT} \cdot \left(\frac{p_{a1}^2 - p_i^2}{\delta} \right) \cdot A$$

où $A = \pi r_1^2$; δ — l'épaisseur du matériel poreux; T — la température absolue; R — la constante universelle des gaz.

Le débit de liquide qui traverse l'interstice a l'expression:

$$G_{in} = \frac{h^3}{24\eta} \cdot \frac{1}{RT} \cdot \frac{2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} (p_i^2 - p_e^2).$$

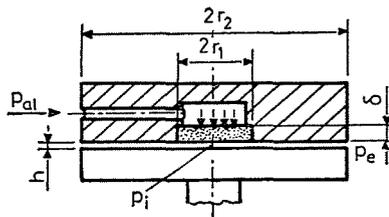


Fig. 11. La délinéation du palier à élément poreux

De l'égalité de deux relations, il résulte:

$$\frac{p_i^2}{p_e^2} = \frac{A \frac{p_{a1}^2}{p_e^2} + 1}{A + 1} \quad \text{où} \quad A = \frac{6K_p \cdot r^2 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}{h^3}$$

est le paramètre de l'alimentation.

La capacité de chargement, exprimée d'une manière adimensionnelle par $W = P/A_t \cdot p_e$, sera donnée par la relation:

$$W = -p_i \cdot \sigma^2 \cdot e^z \sqrt{\frac{\pi}{4a}} \left(E_{\text{erf}}(\sqrt{a}) - E_{\text{erf}}\left(\frac{1}{p_i} \sqrt{a}\right) \right)$$

$$\text{où} \quad A_t = \pi r_2^2; \quad \sigma = \frac{r_1}{r_2} \leq 0.25;$$

$$a = -\frac{2p_i^2 \cdot \ln \sigma}{p_i^2 - 1}; \quad P = \frac{p_i}{p_e}$$

et

$$E_{\text{erf}}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-x^2} dx$$

représente la fonction des erreurs selon Gauss.

L'utilisation de l'élément poreux accroît la capacité portante du palier et lui confère une meilleure stabilité au moment de renversement.

On a birèvement présenté les types principaux de paliers spéciaux utilisés dans la construction d'appareils et d'équipements de mécanique de précision qui leur confèrent des caractéristiques impossible à atteindre par les solutions classiques et qui représentent des objectifs permanents de recherche.

Bibliographie

1. DEMIAN, T. și PASCU, A. — Le calcul et la projection des paliers aux gaz pour les appareils. *Buletinul Institutului Politehnic București, seria Mecanică*, vol. XLVI—XLVII, 1984—1985, pp. 28—31.
2. DEMIAN, T., PASCU, A., TRESTIOREANU, G. — Studiul experimental al lagărelor cu aer autoportante cu bandă flexibilă (Étude expérimental des paliers à l'air autoportants, à bande flexible. *Revista Construcția de mașini*, nr. 7/1986, pp. 343—345.
3. DEMIAN, T., PASCU, A., POSTELNICU, V. — Construcția și calculul logărelor autoportante plane cu canale spirale pentru aparate (La construction et le calcul des paliers autoportants plans aux conduits hélicoïdaux pour les appareils. *Revista Construcția de mașini*, nr. 12/1984, pp. 663—664.
4. DEMIAN, T., KOSTRAKIEVICI, S. — Incercări privind lagărele cilindrice radiale din aparate, cu lubrificație ferrofluidică/Essais sur les paliers cylindriques radiaux des appareils, à lubrification ferro-fluidique. *Buletinul Institutului Politehnic București, Seria Mecanică*, vol. XLIX, 1987, pp. 19—24.

5. DEMIAN, T., PASCU, A. — Studiul și calculul unor moi lagăre capilare /Étude et calcul de nouveaux paliers capillaires. *Revista Construcția de mașini*, nr. 1/1986, pp. 21—23.
6. DEMIAN, T., STOICA, Gh., SERIN, B. — Unele aspecte noi privind calculul și experimentarea lagărelor gazostatice cu element poros/Quelques aspects nouveaux concernant le calcul et l'expérimentation des paliers gazostatiques à élément poreux. *Buletinul Institutului Politehnic București, Seria Mecanică*, vol. XLV, 1983, pp. 45—49

Resume

L'ouvrage porte sur certaines solutions de paliers pour la mécanique de précision, récemment utilisés. On compte sur les avantages de certaines solutions constructives pour les petites dimensions. Sont présentées les réalisations de paliers gazodinamiques lobés, paliers à bande flexible, paliers à canaux en spirale, paliers à ferrofluides, paliers capillaires à anneau circulaire, guidages et paliers à élément poreux.

Pour tous ces systèmes on trouve les hypothèse simplifiantes nécessaires à effectuer les calculs et l'on peut y trouver dans quelle mesure les déterminations expérimentales effectuées par l'auteur ont confirmé les résultats du calcul proposé.

L'on y trouve également les caractéristiques poursuivies dans l'utilisation de ces paliers, supérieures du point de vue de l'utilisation des solutions classiques.

Prof. Dr. Ing. habil. Traian DEMIAN Bucarest