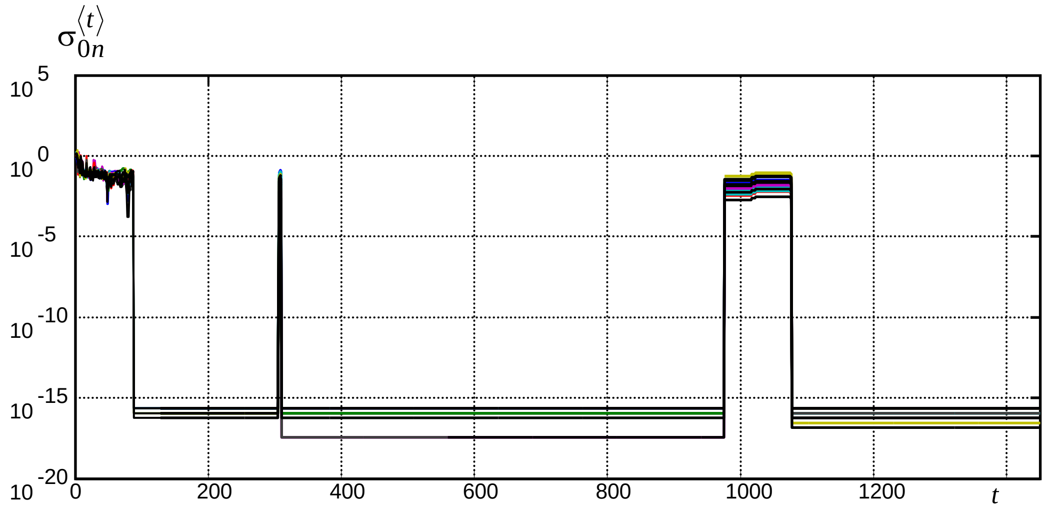

Рис. 5. Изменение СКО родительских особей от поколения к поколению

Предлагаемый метод позволяет ограничить количество базисных функций, которые необходимы для решения задачи аппроксимации, обладает высокой вычислительной эффективностью и допускает распараллеливание вычислений при его реализации на ЭВМ.

Если выбранная длина базиса превышает необходимую, то после определения весовых коэффициентов может быть дополнительно введена операция корреляционного анализа полученного базиса и отброшены избыточные повторяющиеся функции (коэффициент корреляции близок к единице). При этом весовой коэффициент отброшенной функции складывается с весовым коэффициентом выбранной базисной функции.

Библиографический список

1 **Корн, Г.** Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. − М. : Наука, 1974. − 832 с.

2 **Дьяконов, В.П.** Вейвлеты. От теории к практике / В.П. Дьяконов. − М. : Солон-Р, 2002. − 448 с.

3 **Зелкин, Е.Г.** Конструктивные методы аппроксимации в теории антенн / Е.Г. Зелкин, В.Ф. Кравченко, В.И. Гусевский. − М. : САЙНС-ПРЕСС, 2005. − 512 с.

4 **Назаров, А.В.** Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем / А.В. Назаров, А.И. Лоскутов. − СПб. : Наука и техника, 2003. − 384 с.

Bibliography

1 **Korn, G.** Mathematical Handbook for Scientists and Engineers / G. Korn, T. Korn − Moscow : Nauka, 1974. − 832 p.

2 **Djakonov, V.P.** Wavelets. From theory to practice / V.P. Djakonov. − Moscow : Solon-P, 2002. − 448 p.

3 **Zelkin, E.G.** Constructive methods of approximation in the theory of antennas / E.G. Zelkin, V.F. Kravchenko, V.I. Gusevskij. − Moscow : Sains-Press, 2005. − 512 p.

4 **Nazarov, A.V.** Neural network algorithms for prediction and optimization of systems / A.V. Nazarov, A.I. Loskutov. − St.-Petersburg : Nauka and Technika, 2003. − 384 p.

УДК 51 : 621.891 + 06

А.М. Мукутадзе, Н.С. Задорожная, Е.В. Пиневич, Е.В. Поляков

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НЕОДНОРОДНОГО ПОРИСТОГО ПОДШИПНИКА КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ, РАБОТАЮЩЕГО В УСТОЙЧИВОМ НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ПОДАЧЕ СМАЗКИ

Улучшение работы узлов трения может быть достигнуто совершенствованием методов расчета и применением новых подшипниковых материалов. Одним из наиболее эффективных и дешевых заменителей дорогостоящих цветных металлов в подшипниках скольжения являются пористые материалы. Применение пористых материалов упрощает технологический процесс изготовления подшипниковых узлов, значительно снижает их стоимость и повышает их долговечность. Конструкции подшипниковых узлов с пористыми вкладышами позволяют поддерживать режим жидкостного трения подачей смазки в зазор под давлением через поры вкладыша.

Теоретическому анализу работы пористых подшипников посвящено большое количество работ [1–7]. Существенный недостаток этих работ состоит в том, что в расчетных моделях здесь режим трения считается стационарным.

Разработке нестационарной расчетной модели гидродинамической смазки неоднородного пористого подшипника конечной длины при наличии принудительной подачи смазки посвящена работа [8]. В ней, с учетом анизотропии проницаемости в радиальном направлении и наличия принудительной подачи смазки, приводится расчетная модель неоднородного пористого подшипника конечной длины, работающего в устойчивом нестационарном режиме трения. Вначале рассматривается случай, когда смазка принудительно подается в направлении, перпендикулярном оси подшипника, а затем в осевом направлении. Обобщение задачи, рассмотренной в работе [8], для случая ортогональной анизотропии проницаемости пористого слоя было рассмотрено ранее.

Здесь показано, что в рассматриваемом радиальном подшипнике пористая втулка обладает уплотнительным свойством. В данной работе решение задачи, ранее рассмотренной в работе [8], приводится для случая комбинированной подачи смазки, позволяющей значительно повысить несущую способность рассматриваемого радиального пористого подшипника конечной длины.

Постановка задачи. Рассматривается неустановившееся течение вязкой несжимаемой жидкости в зазоре пористого радиального подшипника конечной длины. Подшипник с неоднородным пористым слоем считается неподвижным, а движение вала считается заданным. Проницаемость пористого слоя задается следующей зависимостью

$$k' = A_0 e^{k_1\left(\frac{z}{L}\right)\cdot\frac{y}{H}}. \tag{1}$$

Здесь A_0 – заданная постоянная величина; $k_1\left(\frac{z}{L}\right)$ – известная безразмерная функция; L – длина подшипника; H – толщина пористого слоя.

В дальнейшем будем считать, что на поверхности $y = -H$ проницаемость пористого слоя в направлении оси z меняется по нормальному закону, а комбинированная подача смазки осуществляется как в осевом, так и перпендикулярном оси направлениях (рис. 1).

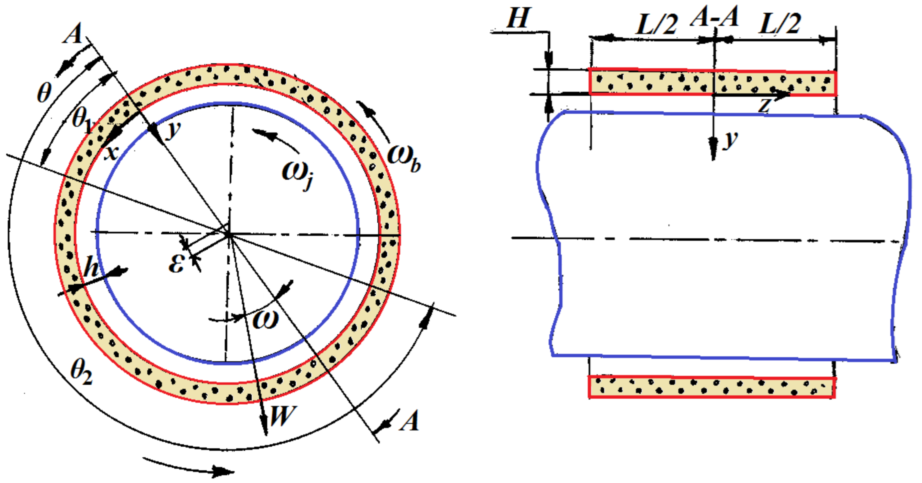

Рис. 1. Радиальный подшипник конечной длины с пористой обоймой

Гидродинамический расчет рассматриваемого подшипника нами будет производиться при следующих допущениях [8].

1 Толщина пористого слоя считается малой по сравнению с радиусом подшипника, и в конечной модели используется короткий подшипник. Уравнение, определяющее течение смазки, в пористой матрице представляется в виде

$$\frac{\partial^2 p^*}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p^*}{\partial z^2} + k_1\left(\frac{z}{L}\right)\frac{1}{H}\frac{\partial p^*}{\partial y} + \frac{y}{H}\frac{\partial p^*}{\partial z}\frac{\partial k_1}{\partial z} = 0, \tag{2}$$

где y, z – прямоугольные координаты (рис. 1); p^* – гидродинамическое давление в пористом слое.

2 Для определения распределения давления в пленке смазки между шипом и подшипником будем исходить из модифицированного уравнения Рейнольдса в рамках модели короткого подшипника [1].

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(h^3\frac{\partial p}{\partial z}\right) = \varepsilon\mu\left(\left(\omega_b + \omega_j - 2\omega_L - 2\frac{d\varphi}{dt}\right)\frac{dh}{d\theta} + 2\frac{de}{dt}\cos\theta\right) - 12\mu v_0\big|_{y=0}, \tag{3}$$

где $h = C(1+\varepsilon\cos\theta)$ – толщина пленки смазки; C – радиальный зазор; $\varepsilon = \dfrac{e}{C}$ – относительный эксцентриситет; e – эксцентриситет; θ – угловая координата; p – давление в пленке смазки; μ – динамический коэффициент вязкости; $\omega_b, \omega_j, \omega_L$ – угловые скорости соответственно подшипника, шипа и нагрузки; φ – угол положения; t – время; v_0 – компонента скорости в направлении Oy на внутренней границе пористого слоя, прилегающая к зазору:

$$v_0 = -\frac{k'}{\mu}\left(\frac{\partial p^*}{\partial y}\right)\Bigg|_{y=0}, \tag{4}$$

где k' – проницаемость материала пористого слоя.

Система уравнений (2)–(3) в случае подачи смазки через поры пористого слоя в направлении оси Oy решается при граничных условиях (рис. 1)

$$p^* = p \ \text{ при } \ y = 0; \quad p^* = p_g \ \text{ при } \ y = -H;$$
$$p^* = p = p_H \ \text{ при } \ z = -\frac{L}{2}; \quad p^* = p = p_K \ \text{ при } \ z = \frac{L}{2}, \tag{5}$$

где p_g – давление подачи смазки; p_H – давление в начальном сечении; p_K – давление в конечном сечении.

Перейдем к безразмерным параметрам по формулам

$$P^* = \frac{p^* C^2}{\mu R_0^2 \omega_j}; \quad P = \frac{pC^2}{\mu R_0^2 \omega_j}; \quad Z = \frac{2z}{L}; \quad Y = \frac{y}{H}; \quad T = \omega_j t,$$
$$k' = A_0 k; \quad k = e^{\frac{\beta Z^2}{4} Y}; \quad \Phi = \frac{A_0 H}{C^3}; \quad \tilde{p}_g = \frac{p_g C^2}{\mu R_0^2 \omega_j}. \tag{6}$$

Установим закон подачи смазки на поверхности $Y = -1$, а также проницаемость пористого слоя на этой поверхности в виде

$$\tilde{P}_g = aZ + b + \tilde{\tilde{P}}_g (Z^2 - 1), \quad \tilde{\tilde{P}}_g = \text{const}, \quad k = e^{\beta\frac{Z^2}{4}}, \beta < 0. \tag{7}$$

Тогда уравнения (2)–(3) принимают вид (в дальнейшем предполагается, что ω_L, ω_b равны нулю)

$$\frac{\partial^2 P^*}{\partial Y^2} + 4\left(\frac{H}{L}\right)^2 \frac{\partial^2 P^*}{\partial Z^2} + \beta\frac{Z^2}{4}\frac{\partial P^*}{\partial Y} + \left(\frac{H}{L}\right)^2 \frac{\beta Z}{2} Y \frac{\partial P^*}{\partial Z} = 0; \tag{8}$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial Z^2} = \frac{12\left(L/D\right)^2}{(1+\varepsilon\cos\theta)^3}\left[\varepsilon\left(\dot{\varphi} - \frac{1}{2}\right)\sin\theta + \dot{\varepsilon}\cos\theta\right] + \frac{3\Phi}{(1+\varepsilon\cos\theta)^3 \left(H/L\right)^2}\left(\frac{\partial P^*}{\partial Y}\right)\Bigg|_{Y=0}, \tag{9}$$

где $D = 2R_0$; точкой обозначено дифференцирование по T.

Граничные условия (5) примут следующий вид:

$$P^* = P \ \text{ при } \ Y = 0; \quad P^* = \tilde{P}_g \ \text{ при } \ Y = -1;$$
$$P^* = P = \tilde{P}_H \ \text{ при } \ Z = -1; \quad P^* = P = \tilde{P}_K \ \text{ при } \ Z = 1, \tag{10}$$

где $\tilde{P}_H = \dfrac{p_H C^2}{\mu R_0^2 \omega_j}; \quad \tilde{P}_K = \dfrac{p_K C^2}{\mu R_0^2 \omega_j}$.

Полагая толщину пористого слоя малой, уравнение (9) усредним по толщине смазочного слоя. Тогда уравнение (9) запишется в виде

$$\int_0^1 \left(\frac{\partial^2 P^*}{\partial Y^2} + 4\left(\frac{H}{L}\right)^2 \frac{\partial^2 P^*}{\partial Z^2} + \beta\frac{Z^2}{4}\frac{\partial P^*}{\partial Y} + \frac{1}{2}\left(\frac{H}{L}\right)^2 \beta Z Y \frac{\partial P^*}{\partial Z}\right) dY = 0. \tag{11}$$

Решение уравнений (8) и (9), удовлетворяющее граничным условиям (10) с учетом (11), будем искать в виде

$$P = aZ + b + P_1;$$
$$P^* = A_1Y^3 + A_2Y^2 + A_3Y + P_1(Z,0) + aZ + b. \quad (12)$$

Подставляя (12) в (8) и (9) с учетом (11), будем иметь

$$-A_1 + A_2 - A_3 + P_1 = \tilde{\tilde{P}}_g(Z^2 - 1),$$

$$3A_1 - 2A_2 + \beta\frac{Z^2}{4}\left(-A_1 + A_2 - A_3\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{H}{L}\right)^2 \beta Z\left(-\frac{1}{5}\frac{\partial A_1}{\partial Z} + \frac{1}{4}\frac{\partial A_2}{\partial Z} - \frac{1}{3}\frac{\partial A_3}{\partial Z} + \frac{1}{2}\frac{\partial P_1}{\partial Z} + \frac{a}{2}\right) +$$
$$+4\left(\frac{H}{L}\right)^2\left(\frac{1}{4}\frac{\partial^2 A}{\partial Z^2} - \frac{1}{3}\frac{\partial^2 A_2}{\partial Z^2} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 A_3}{\partial Z^2} - \frac{\partial^2 P_1}{\partial Z^2}\right) = 0. \quad (13)$$

Полагая

$$\frac{2}{3}\left(\frac{H}{L}\right)^2\frac{\partial^2 A_3}{\partial Z^2} - \frac{\beta\tilde{\tilde{P}}_g}{4}\left(Z^4 - Z^2\right) - 2\tilde{\tilde{P}}_g\left(Z^2 - 1\right) + \frac{1}{4}\left(\frac{H}{L}\right)^2 a\beta Z = 0, \quad (14)$$

для определения функции A_1 придем к следующему уравнению:

$$A_1 - 2A_3 + 2P_1 - \beta\frac{Z^2}{4}P_1 + \frac{\beta Z}{2}\left(\frac{H}{L}\right)^2\left(\frac{1}{20}\frac{\partial A_1}{\partial Z} + \frac{1}{4}\frac{\partial P_1}{\partial Z} - \frac{1}{12}\frac{\partial A_3}{\partial Z} + \frac{\tilde{\tilde{P}}_g Z}{2}\right) +$$
$$+4\left(\frac{H}{L}\right)^2\left(-\frac{1}{12}\frac{\partial^2 A_1}{\partial Z^2} - \frac{2}{3}\frac{\partial^2 P_1}{\partial Z^2} - \frac{2}{3}\tilde{\tilde{P}}_g\right) = 0. \quad (15)$$

Интегрируя уравнение (14), будем иметь

$$A_3 = \frac{3}{2}\left(\frac{H}{L}\right)^2\left[\frac{\beta}{24}\tilde{\tilde{P}}_g\left(\frac{Z^6}{5} - \frac{Z^4}{2}\right) + \tilde{\tilde{P}}_g\left(\frac{Z^4}{6} - Z^2\right) + \tilde{\tilde{P}}_g\left(\frac{\beta}{80} + \frac{5}{6}\right)\right] - \frac{1}{18}a\beta\left(Z^3 - Z\right). \quad (16)$$

Уравнение (15) решается после определения P_1. Явный вид функции P_1 при определении несущей способности подшипника нам не понадобится.

С учетом (16) решение уравнения (9) запишется в виде

$$P_1 = \frac{\left(L/D\right)^2}{\left(1 + \varepsilon\cos\theta\right)^3}\left[\varepsilon\left(\dot{\varphi} - \frac{1}{2}\right)\sin\theta + \dot{\varepsilon}\cos\theta\right]\left(Z^2 - 1\right) + \frac{9\Phi}{2\left(1 + \cos\theta\right)^3}\left(\frac{L}{H}\right)^4\left[\frac{\beta}{480}\tilde{\tilde{P}}_g\left(\frac{Z^8}{14} - \frac{Z^6}{3} + \frac{11}{42}\right) +\right.$$
$$\left.\frac{1}{12}\tilde{\tilde{P}}_g\left(\frac{Z^6}{15} - Z^4 + \frac{14}{15}\right) + \frac{1}{4}\tilde{\tilde{P}}_g\left(\frac{\beta}{40} + \frac{5}{3}\right)\left(Z^2 - 1\right)\right] - \frac{\Phi}{12\left(1 + \varepsilon cos\theta\right)^3}\left(\frac{L}{H}\right)^2 a\beta\left[\frac{Z^5}{10} - \frac{Z^3}{3} + \frac{7}{30}Z\right]. \quad (17)$$

Перейдем к определению усилий масляной пленки.

При неполном заполнении смазкой зазора область положительных давлений, ограниченная углами θ_1 и θ_2, определяется из условий

$$\dot{\varepsilon}\cos\theta_1 + \varepsilon\dot{\varphi}\sin\theta_1 = 0,$$
$$\dot{\varepsilon}\sin\theta_2 - \varepsilon\dot{\varphi}\cos\theta_2 = 0, \quad \theta_2 = \theta_1 + \pi.$$

В рассматриваемом случае усилия масляной пленки вычисляются интегрированием по положительной области распределения давления.

$$F^{(e)} = -\frac{\mu R^3\omega_j L}{C^2}\int_{-1}^{1}\int_{\theta_1}^{\theta_1+\pi} P\cos\theta d\theta dZ;$$
$$F^{(\varphi)} = -\frac{\mu R^3\omega_j L}{C^2}\int_{0}^{1}\int_{\theta_1}^{\theta_1+\pi} P\sin\theta d\theta dZ. \quad (18)$$

При полном заполнении смазкой зазора

$$F^{(e)} = -\frac{\mu R^3 \omega_j L}{2C^2} \int_{-1}^{1} \int_{0}^{2\pi} P \cos\theta d\theta dZ;$$

$$F^{(\varphi)} = -\frac{\mu R^3 \omega_j L}{2C^2} \int_{-1}^{1} \int_{0}^{2\pi} P \sin\theta d\theta dZ \cdot \qquad (19)$$

Здесь P определяется формулой (17).

Решение задачи на устойчивость шипа в подшипнике

Безразмерные уравнения, определяющие движение шипа, записываются в следующем виде:

$$\frac{d^2\varepsilon}{dT^2} = -\frac{F^e}{\omega_J^2 MC} + \left(\frac{\omega_g}{\omega_j}\right)^2 \cos\varphi + \varepsilon\left(\frac{d\varphi}{dT}\right)^2;$$

$$\frac{d^2\varphi}{dT^2} = \frac{F^{\varphi}}{\varepsilon\omega_J^2 MC} - \frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\omega_g}{\omega_j}\right)^2 \sin\varphi - \frac{2}{\varepsilon}\left(\frac{d\varepsilon}{dT}\right)\left(\frac{d\varphi}{dT}\right), \qquad (20)$$

где M – масса ротора; $F^{(e)}$ и $F^{(\varphi)}$ – усилия масляной пленки в случае неполного заполнения смазкой зазора определяются формулами (18), в случае полного заполнения – формулами (19).

Уравнения (20), определяющие движение шипа, решаются численно с учетом полученных данных (17)–(20). Компоненты ускорения $\frac{d^2\varepsilon}{dT^2}$, $\frac{d^2\varphi}{dT^2}$ представляют собой явные функции параметров ε и φ, $\frac{d\varepsilon}{dT}, \frac{d\varphi}{dT}, \tilde{\tilde{P}}_g, \tilde{P}_H, \tilde{P}_K, \theta_1, \theta_2, \Phi, \beta, a$.

Уравнения (20) записывается в стандартной форме первого порядка и решается с помощью метода, разработанного Гиром [9].

Как и в работе [8], после получения решения уравнений движения устойчивость рассматриваемого движения определяется визуально по графику. При заданных значениях выше указанных параметров области устойчивости приведены на рис. 2. Здесь все точки, которые лежат ниже кривых устойчивости, соответствуют устойчивому движению шипа, а все точки, которые лежат выше кривых, соответствуют неустойчивому движению $\left(\omega_j = \sqrt{g/C}\right)$, где g – ускорение силы тяжести.

Рис. 2. Схематическое изображение границ устойчивости при комбинированной подаче смазки ($\tilde{\varepsilon} = 10^2\varepsilon$)

На рисунке сделаны следующие обозначения:

$1 – \Phi = 0{,}03;\ \beta = –0{,}01;\ \tilde{P}_{н} = 0{,}04;\ \tilde{P}_{к} = 0{,}03;\ \tilde{\tilde{P}}_{g} = 0{,}1;\ \alpha = 0{,}005;$

$2 – \Phi = 0{,}03;\ \beta = –0{,}01;\ \tilde{P}_{н} = 0{,}04;\ \tilde{P}_{к} = 0{,}03;\ \tilde{\tilde{P}}_{g} = 0{,}1;\ \alpha = 0{,}005;$

$3 – \Phi = 0{,}02;\ \beta = –0{,}01;\ \tilde{P}_{н} = 0{,}04;\ \tilde{P}_{к} = 0{,}03;\ \tilde{\tilde{P}}_{g} = 0;\ \alpha = 0{,}005;$

$4 – \Phi = 0{,}01;\ \beta = –0{,}01;\ \tilde{P}_{н} = 0{,}04;\ \tilde{P}_{к} = 0{,}03;\ \tilde{\tilde{P}}_{g} = 0;\ \alpha = 0{,}005;$

$5 – \Phi = 0{,}005;\ \beta = –0{,}01;\ \tilde{P}_{н} = 0{,}04;\ \tilde{P}_{к} = 0{,}03;\ \tilde{\tilde{P}}_{g} = 0;\ \alpha = 0{,}005;$

$6 – \Phi = 0{,}003;\ \beta = –0{,}01;\ \tilde{P}_{н} = 0{,}04;\ \tilde{P}_{к} = 0{,}03;\ \tilde{\tilde{P}}_{g} = 0;\ \alpha = 0{,}005;$

$7 – \Phi = 0{,}001;\ \beta = –0{,}01;\ \tilde{P}_{н} = 0{,}04;\ \tilde{P}_{к} = 0{,}03;\ \tilde{\tilde{P}}_{g} = 0;\ \alpha = 0{,}005.$

Из приведенных на рис. 2 зависимостей следует, что:

1 Устойчивость движения шипа существенно зависит от конструктивного параметра Ф и параметра $\tilde{\tilde{P}}_{g}$, обусловленного подачей смазки в направлении, перпендикулярном оси подшипника.

2 С увеличением значений параметров Ф и $\tilde{\tilde{P}}_{g}$ область устойчивости значительно расширяется.

3 При комбинированной подаче смазки подшипник работает более устойчиво по сравнению с осевым или перпендикулярным оси направлениям подачи смазки.

Библиографический список

1 **Толпинская, Н.Б.** Пористый подшипник конечной длины с подачей смазки через поры вкладыша : дис. … канд. техн. наук / Н.Б. Толпинская. – Ростов н/Д, 1986. – С. 20–40.

2 **Ахвердиев, К.С.** Неоднородный подшипник скольжения / К.С. Ахвердиев, Е.С. Подрезов. – Ростов н/Д, 1987. – 26 с. – Деп. в ЦНИИТЭИ МПС № 4078.

3 **Ахвердиев, К.С.** Гидродинамический расчет пористых подшипников с переменной проницаемостью вдоль оси с учетом нелинейных факторов / К.С. Ахвердиев, Л.И. Прянишникова, Ю.И. Пустовойт // Трение и износ. – 1993. – Т. 14. – № 5. – С. 813–821.

4 **Ахвердиев, К.С.** Об одном точном решении задачи о радиальном пористом подшипнике конечной длины / К.С. Ахвердиев, Л.И. Прянишникова // Трение и износ. – 1991. – Т. 12. – № 1. – С. 24–32.

5 Математическая модель течения смазки в зазоре радиального подшипника конечной длины со слоистым пористым вкладышем переменной толщины / К.С. Ахвердиев, В.М. Приходько, А.И. Шевченко, О.Р. Казанчан // Проблемы машиностроения. – 2000. – № 6.

6 Гидродинамический расчет радиального пористого подшипника бесконечной длины с повышенной несущей способностью с учетом сил инерции // М.А. Мукутадзе, Е.Е. Александрова, А.А. Константинов, А.И. Шевченко // Вестник РГУПС. – 2012. – № 2(46). – С. 194–197.

7 **Ахвердиев, К.С.** Радиальный пористый подшипник конечной длины, обладающий повышенной несущей способностью с учетом сил инерции / К.С. Ахвердиев, Е.В. Коваленко, М.А. Мукутадзе // Вестник РГУПС. – 2011. – № 2(42). – С. 155–160.

8 Расчетная модель гидродинамической смазки неоднородного пористого подшипника конечной длины, работающего в устойчивом нестационарном режиме трения при наличии принудительной подачи смазки / К.С. Ахвердиев, М.А. Мукутадзе, Н.С. Задорожная, Б.М. Флек, Е.В. Поляков // Инженерный вестник Дона. Электронный научный журнал. – 2013. – № 3 (26). – С. 9. – URL : http://www.ivdon.ru.

9 **Gear, C.W.** Numarical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations / C.W. Gear. – Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1972.

Bibliography

1 **Tolpinskaya, N.B.** Porous bearing of finite length with feed lubrication through the pores of the insert : dis. ... Candidate Tech. Science / N.B. Tolpinskaya. – Rostov-on-Don, 1986. – P. 20–40 .

2 **Akhverdiev, K.S.** Inhomogeneous bearing / K.S. Akhverdiev, E.S. Podrezov. – Rostov-on-Don, 1987. – 26 p. – Deposited in Central Research Institute of information and feasibility studies of Ministry of Railways of the Russian Federation № 4078 .

3 **Akhverdiev, K.S.** Hydrodynamic calculation of porous bearings with variable permeability axis taking into account nonlinear factors / K.S. Akhverdiev, L.I. Pryanishnikova, Yu.I. Pustovoyt // Friction and wear. – 1993. – Vol. 14. – № 5. – P. 813–821.

4 **Akhverdiev, K.S.** On the exact solution of the problem of porous radial bearing of finite length / K.S. Akhverdiev, L.I. Pryanishnikova // Friction and wear. – 1991. – Vol. 12. – № 1. – P. 24–32 .

5 Mathematical model of lubricant flow in the gap of the radial bearing of finite length with a layered porous insert variable thickness / K.S. Akhverdiev, V.M. Prikhodko, A.I. Shevchenko, O.R. Kazanchan // Problems of Mechanical Engineering. – 2000. – № 6.

6 Hydrodynamic calculation of the radial bearing porous infinite length with the extra load , taking into account the inertia forces // M.A. Mukutadze, E.E. Aleksandrov, A.A. Konstantinov, A.I. Shevchenko // Vestnik RGUPS. – 2012. – № 2 (46). – P. 194–197 .

7 **Akhverdiev, K.S.** Porous radial bearing of finite length , having increased carrying capacity , taking into account the inertia forces / K.S. Akhverdiev, E.V. Kovalenko, M.A. Mukutadze // Vestnik RGUPS. – 2011. – № 2 (42). – P. 155–160 .

8 Mathematical model of hydrodynamic lubrication inhomogeneous porous bearing of finite length, operating in a stable mode unsteady friction in the presence of forced lubrication / K.S. Akhverdiev, M.A. Mukutadze, N.S. Zadorozhnaya, B.M. Fleck, E.V. Polyakov // Inzenernyj vestnik Dona (Rus). Electronic Scientific Journal. – 2013. – № 3 (26). – C. 9. – URL : http://www.ivdon.ru.

9 **Gear, C.W.** Numarical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations / C.W. Gear. – Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1972.