УДК 51:621.891
DOI: 10.25206/1813-8225-2021-176-10-14

К. С. АХВЕРДИЕВ
Е. А. БОЛГОВА
Е. О. ЛАГУНОВА
С. В. КУМАНИН

Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КЛИНОВИДНОЙ СИСТЕМЫ «ПОЛЗУН—НАПРАВЛЯЮЩАЯ», РАБОТАЮЩЕЙ НА СЖИМАЕМОМ СМАЗОЧНОМ МАТЕРИАЛЕ В УСЛОВИЯХ НАЛИЧИЯ РАСПЛАВА НА ПОВЕРХНОСТИ НАПРАВЛЯЮЩЕЙ

В статье на основе уравнения движения сжимаемого смазочного материала для «тонкого слоя», неразрывности, состояния и уравнения, описывающего профиль расплавленного контура с учетом формулы диссипации механической энергии, найдены асимптотическое и автомодельное решения для экстремального (когда скорость стремится к бесконечности) и не экстремального случая. В результате решения задачи получена уточненная математическая расчетная модель клиновидной опоры скольжения с легкоплавким металлическим покрытием на подвижной контактной поверхности, компенсирующей аварийный недостаток смазочного материала и обеспечивающей стабильный режим гидродинамического смазывания.

Ключевые слова: сжимаемый жидкий смазочный материал, несущая способность, сила трения, клиновидная опора скольжения, метод последовательных приближений, автомодельное решение, легкоплавкое металлическое покрытие.

Введение. В последнее время применяются новые модели гидродинамической смазки [1—10] в подшипниках скольжения в виде жидкой металлической пленки, полученной в результате плавления одной из рабочих поверхностей. В существующих расчетных моделях в основном рассматривают случаи, когда смазочная жидкость, обусловленная расплавом, является несжимаемой [11—20], а в рабочих моделях, учитывающих сжимаемость смазочного материала, не учитывается клиновидность опор скольжения «ползун—направляющая». Существенным недостатком полученных результатов [11—20] является то, что подобного рода рассматриваемые конструкции подшипников скольжения не обладают повышенной несущей способностью. В предлагаемой нами расчетной модели упорного подшипника, работающего в условиях наличия расплава на одной из его рабочих поверхностей, одновременно учитывается клиновидность системы «ползун—направляющая» до расплава, а также сжимаемость смазочной среды, обусловленной расплавом поверхности направляющей.

Постановка задачи. Рассмотрена клиновидная система скольжения, состоящая из пяты (ползуна), у которого температура плавления выше, чем у опорного кольца, покрытого легкоплавким металлическим сплавом. Анализ рассматриваемой системы приводится для бесконечно широкого ползуна (рис. 1).

Для решения данной задачи использовано общеизвестное уравнение: для «тонкого слоя» уравнение движения вязкой жидкости; уравнение неразрывности; уравнение состояния, а также уравнение, описывающее профиль расплавленного контура поверхности опорного кольца с легкоплавким покрытием с учетом скорости диссипации энергии в расчете на единицу длины. В системе координат $x'Oy'$ вышеуказанная система имеет вид:

$$\mu\frac{\partial^2 v_{x'}}{\partial y'^2}=\frac{dp'}{dx'},\qquad \frac{\partial\left(\rho' v'_{x'}\right)}{\partial x'}+\frac{\partial\left(\rho' v'_{y'}\right)}{\partial y'}0,\qquad \rho'=f\left(p'\right),$$

$$u^{*}L'\frac{dH'}{dx'}=2\mu\int\limits_{-H'(x')}^{h(x')}\left(\frac{\partial v_{x'}}{\partial x'}\right)^2 dy'. \qquad (1)$$

Здесь $v'_{x'}$, $v'_{y'}$ — компоненты вектора скорости, p' — гидродинамическое давление, μ — динамиче-

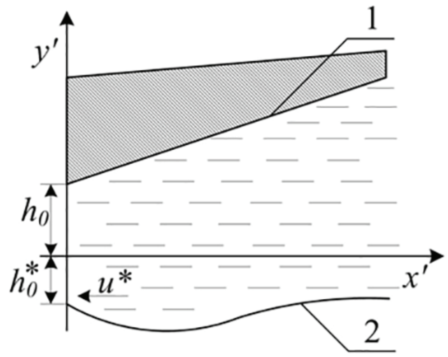

Рис. 1. Клиновидная система «ползун–направляющая с расплавленной поверхностью»: 1 — уравнение контура ползуна $y' = h_0 + x'tg\alpha = h(x')$**; 2 — уравнение расплавленного контура направляющей** $y' = -H'(x') = -\beta'\varphi\left(\frac{x'}{L}\right)$

ский коэффициент вязкости, $p' = \frac{\lambda L u^* \rho'}{2h_0^*}$ (формула Вейсбаха–Дарси), ρ' — плотность, u^* — скорость скольжения направляющей, λ — коэффициент потерь на трение $\left(\lambda = 0{,}11\delta^*/h_0\right)$, δ^* — абсолютный размер микронеровности ползуна, L — длина пяты, L' — удельная теплота плавления на единицу объема.

Система уравнений (1) решается при следующих общеизвестных граничных условиях:

$$v_{x'} = 0, \quad v_{y'} = 0$$
$$\text{при} \quad y' = h_0 + x'tg\alpha = h'(x');$$

$$v_{x'} = -u^*, \quad v_{y'} = 0$$
$$\text{при} \quad y' = -\beta'\varphi\left(\frac{x'}{L}\right) = -H'(x');$$

$$H'(x') = h_0^*$$
$$\text{при} \quad x' = 0; \quad p'(0) = p'(L) = p_a, \tag{2}$$

где h_0^* — толщина расправленного покрытия.

Переходя к безразмерным переменным по формулам:

$$x' = Lx; \quad y' = h_0 y;$$
$$v'_{x'} = u^* v; \quad v'_{y'} = u^*\varepsilon u; \quad \varepsilon = \frac{h_0}{L};$$
$$h(x') = h_0 h(x); \quad H'(x) = h_0^* H(x);$$
$$p' = p_a p; \quad \rho' = \rho^* \rho; \quad \rho^* = \frac{2h_0 p_a}{\lambda L u^*}$$

систему уравнений (1) и граничные условия (2) можно записать в виде:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{1}{\Lambda}\frac{dp}{dx}, \quad \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} = 0, \quad \rho = p,$$

$$\frac{dH(x)}{dx} = K\int_{-H(x)}^{h(x)}\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 dy, \tag{3}$$

где $K = \frac{2\mu u^* h_0}{L^* L}, \quad \Lambda = \frac{u^*\mu L}{p_a h_0^2};$

$$u = 0, \quad v = 0 \quad \text{при} \quad y = 1 + \eta x = h(x),$$

$$u = 0, \quad v = -1 \quad \text{при} \quad y = -H(x) = -\frac{\beta'}{h_0}\varphi(x),$$

$$p(0) = p(1) = 1, \quad H(x) = \frac{h_0^*}{h_0} = \tilde{h}_0^* \quad \text{при} \quad x = 0. \tag{4}$$

Проинтегрируем первое уравнение системы (3). Учитывая граничные условия, получаем:

$$v_x = \frac{1}{2\Lambda}\frac{dp}{dx}\left(y^2 - (h(x) + H(x))y + h(x)H(x)\right) + \\ + \frac{y}{h(x) + H(x)} - \frac{h(x)}{h(x) + H(x)}. \tag{5}$$

Пусть $u^* \to \infty$, следовательно, $\Lambda \to \infty$ и для v_x имеем:

$$v_x = \frac{y}{h(x) + H(x)} - \frac{h(x)}{h(x) + H(x)}. \tag{6}$$

С учетом (6) из второго уравнения системы (3) для определения получаем:

$$p = \frac{2C}{h(x) + H(x)}. \tag{7}$$

Следовательно, в нашем экстремальном случае выражение гидродинамического давления будет найдено после того, как определим $H(x)$.

Применяем четвертое уравнение системы (3), имеем:

$$\frac{dH(x)}{dx} = K\int_{-H(x)}^{h(x)}\left(\frac{1}{h(x) + H(x)}\right)^2 dy. \tag{8}$$

Интегрируем его и получаем:

$$H(x) = \tilde{h}_0^* + K\int_0^x \frac{dx}{h(x) + H(x)}. \tag{9}$$

Уравнение (9) решаем методом последовательных приближений:

$$H_0 = \tilde{h}_0^*,$$

$$H_1 = \tilde{h}_0^* + K\int_0^x \frac{dx}{1 + \tilde{h}_0^* + \eta x} = \tilde{h}_0^* + \frac{K}{1 + \tilde{h}_0^*}\left(x - \tilde{\eta}\frac{x^2}{2}\right), \tag{10}$$

где $\tilde{\eta} = \frac{\eta}{1 + \tilde{h}_0^*}$.

Интегрально осредним H_1 в промежутке [0,1], получаем:

$$\tilde{H}_1 = \tilde{h}_0^* + K\left(\frac{1}{2} - \frac{\tilde{\eta}}{6}\right) = \alpha^*. \tag{11}$$

С учетом (7) и (11) для определения гидродинамического давления будем иметь:

$$p = \frac{2C}{1 + \eta x + \alpha^*} = \frac{2C}{(1 + \alpha^*)}\left(1 - \tilde{\tilde{\eta}}x\right), \tag{12}$$

где $\tilde{\tilde{\eta}} = \frac{\eta}{1 + \alpha^*}$.

Учитывая (6) и (12) для несущей способности и силы трения подшипников скольжения в рассматриваемом экстремальном случае, получим:

$$W=\int_0^1 p\,dx=\frac{2C}{(1+\alpha^*)}\left(1-\frac{\tilde{\tilde{\eta}}}{2}\right),\quad C=\frac{(1+\alpha^*)}{2},$$

$$L_{\text{тр}}=\int_0^1\frac{dx}{1+\alpha^*+\eta x}=\frac{1}{(1+\alpha^*)}\left(1-\frac{\tilde{\tilde{\eta}}}{2}\right). \qquad (13)$$

В не экстремальном случае (в случае, когда $\Lambda\to 0$), прежде чем найти точное автомодельное решение задачи $(3)-(4)$ $\frac{\partial v}{\partial y}$, осредним интегрально в промежутке $[-H(x),h(x)]$.

$$\frac{\partial v}{\partial y}\approx\frac{1}{h(x)+H(x)}\int_{-H(x)}^{h(x)}\frac{\partial v}{\partial y}dy=-\frac{1}{h(x)+H(x)}.$$

Следовательно, $\int_{-H(x)}^{h(x)}\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 dy=\frac{1}{h(x)+H(x)}$.

Используя последнее уравнение системы (3) для определения $H(x)$, придем к следующему уравнению:

$$\frac{dH(x)}{dx}=\frac{1}{h(x)+H(x)}\ . \qquad (14)$$

Интегрируя уравнение (14), получим:

$$H(x)=h_0^*+\int_0^x\frac{K}{1+\eta x+H(x)}dx. \qquad (15)$$

Решая это уравнение методом последовательных приближений для H_0 и H_1, получим выражение, приведенное в виде формулы (10). Интегрально осредняя в промежутке [0,1], значение H_1 определяется формулой (11). С учетом (11) точное автомодельное решение задачи $(3)-(4)$ ищем в виде:

$$\rho v(x,y)=\frac{\partial\psi(x,y)}{\partial y}+V(x,y);$$

$$\rho u(x,y)=-\frac{\partial\psi(x,y)}{\partial x}+U(x,y);$$

$$\psi(x,y)=\tilde{\psi}(\xi);\quad V(x,y)=\rho\tilde{v}(\xi);$$

$$U(x,y)=-\rho h'(x)\tilde{u}(\xi);$$

$$\frac{p}{\Lambda}\frac{dp}{dx}=\frac{\tilde{C}_1 p}{h^2}+\frac{\tilde{C}_2}{h^3},\quad \xi=\frac{y+\alpha^{\cdot}}{h(x)+\alpha^{\cdot}}. \qquad (16)$$

Подставляя (16) в (3) и (4), придем к следующей системе уравнений и граничным условиям к ним:

$$\frac{d^3\tilde{\psi}}{d\xi^3}=\tilde{C}_2;\quad \frac{d^2\tilde{v}}{d\xi^2}=\tilde{C}_1;$$

$$\frac{d\tilde{u}}{d\xi}+\frac{h(x)}{\rho h'(x)}\frac{dp}{dx}\tilde{v}-\xi\frac{d\tilde{v}}{d\xi}=0. \qquad (17)$$

$$\frac{d\tilde{\psi}}{d\xi}=0$$

при $\xi=0,\ \xi=1;\quad \tilde{v}(0)=1;\quad \tilde{u}(0)=0;$

$$\tilde{v}(1)=0;\quad \tilde{u}(1)=0;$$

$$p(0)=p(1)=1;\quad \int_0^1\tilde{v}(\xi)d\xi=0. \qquad (18)$$

Интегрируя $(17)-(18)$, получим:

$$\tilde{\psi}'(\xi)=\frac{\tilde{C}_2}{2}(\xi^2-\xi),$$

$$\tilde{v}(\xi)=\tilde{C}_1\frac{\xi^2}{2}+\left(1-\frac{\tilde{C}_1}{2}\right)\xi-1,$$

$$\tilde{C}_1=-6, \qquad (19)$$

константа $\tilde{C}_2$ определяется из условия $p(0)=p(1)=1$.

Для определения гидродинамического давления приходим к следующему уравнению:

$$\frac{p}{\Lambda}\frac{dp}{dx}=\frac{-6p}{(1+\eta x+\alpha^{\cdot})^2}+\frac{\tilde{C}_2}{(1+\eta x+\alpha^{\cdot})^3}. \qquad (20)$$

С учетом (20), получим:

$$p=\Lambda\int_0^x\left(\frac{-6p}{(1+\eta x+\alpha^{\cdot})^2}+\frac{\tilde{C}_2}{(1+\eta x+\alpha^{\cdot})^3}\right)dx+1. \qquad (21)$$

Уравнение (21) определяем методом последовательных приближений:

$$p_0=1,\quad p_1=-\frac{6\Lambda}{(1+\alpha^{\cdot})^2}\left(x-\tilde{\tilde{\eta}}x^2+\tilde{\tilde{\eta}}^2x^3\right)+$$

$$+\frac{\tilde{C}_2}{(1+\alpha^{\cdot})^3}\left(x-\frac{3}{2}\tilde{\tilde{\eta}}x^2+2\tilde{\tilde{\eta}}^2x^3\right). \qquad (22)$$

Используя граничное условие $p(0)=p(1)=1$, для $\tilde{C}_2$ получим следующее выражение:

$$\tilde{C}_2=6\Lambda(1+\alpha^{\cdot})^2\left(1+\frac{1}{2}\tilde{\tilde{\eta}}-\frac{1}{4}\tilde{\tilde{\eta}}^2\right). \qquad (23)$$

Применяя выражение (23), для p_1 имеем:

$$p_1=\frac{6\Lambda}{(1+\alpha^{\cdot})^2}\left(\begin{aligned}&-\frac{3}{2}\tilde{\tilde{\eta}}x^2+\frac{1}{2}\tilde{\tilde{\eta}}x+\tilde{\tilde{\eta}}x^2+\\&+\tilde{\tilde{\eta}}^2x^3-\frac{3}{4}\tilde{\tilde{\eta}}^2x^2-\frac{\tilde{\tilde{\eta}}^2}{4}x\end{aligned}\right)+1. \qquad (24)$$

Используя формулы (19) и (24), для несущей способности и силы трения подшипников скольжения получим:

$$W=\frac{6\Lambda}{(1+\alpha^{\cdot})^2}\left(\frac{\tilde{\tilde{\eta}}}{12}-\frac{\tilde{\tilde{\eta}}^2}{8}\right);$$

$$L_{\text{тр}}=\int_0^1\left(\begin{aligned}&\left.\frac{\partial^2\tilde{\psi}}{\partial\xi^2}\right|_{\xi=0}\frac{1}{\rho(h(x)+\alpha^{\cdot})}+\\&+\left.\frac{\partial\tilde{v}}{\partial\xi}\right|_{\xi=0}\frac{1}{(h(x)+\alpha^{\cdot})}\end{aligned}\right)dx=$$

$$=-\frac{6\Lambda}{P(1+\alpha^{\cdot})^2}\left(1-\frac{\tilde{\tilde{\eta}}}{2}+\frac{\tilde{\tilde{\eta}}^2}{4}\right)+\frac{4}{(1+\alpha^{\cdot})}\left(1-\frac{\tilde{\tilde{\eta}}}{2}+\frac{\tilde{\tilde{\eta}}^2}{3}\right), \qquad (25)$$

где $P=\sup_{x\in[0,1]}p_1$, $\quad\tilde{\tilde{\eta}}=\frac{\eta}{1+\alpha^{\cdot}}$.

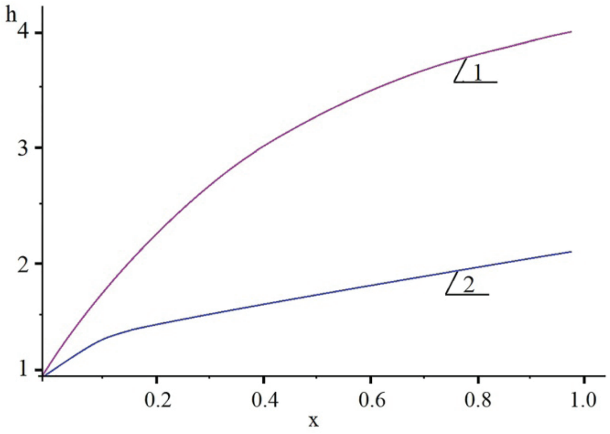

Рис. 2. Зависимость толщины пленки с учетом расплава от координаты x при 1 — 2K=1,8; 2 — 2K=0,95

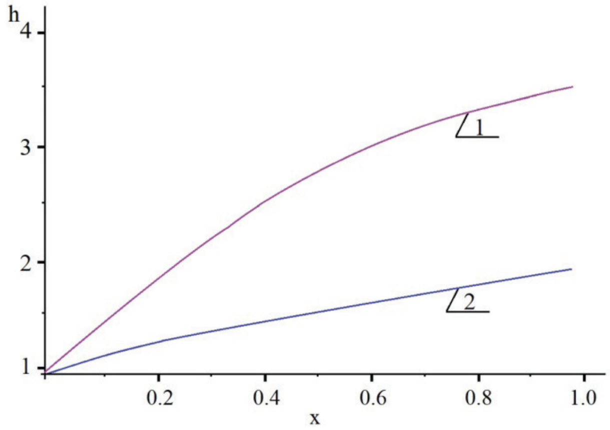

Рис. 4. Зависимость толщины пленки, с учетом расплава от координаты x при 1 — 2K=1,8; 2 — 2K=0,95

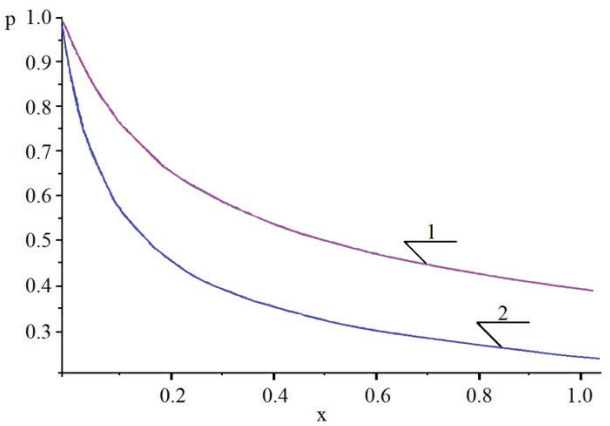

Рис. 3. Зависимость давления от координаты x при 1 — 2K=0,95; 2 — 2K=1,8

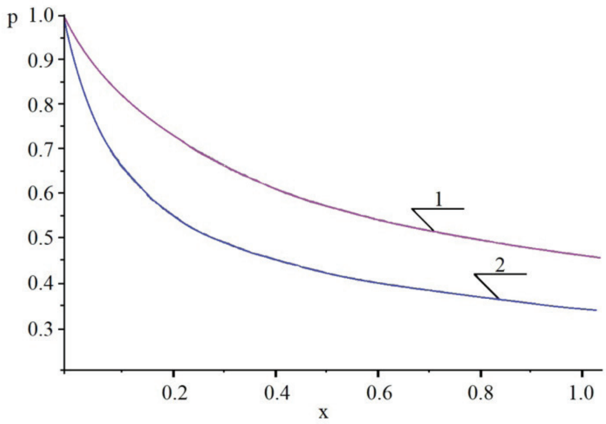

Рис. 5. Зависимость давления от координаты при 1 — 2K=0,95; 2 — 2K=1,8

Анализ полученных результатов. В частном случае, когда подшипник работает только на смазке, обусловленной расплавом поверхности направляющей (т.е. когда $h(x)=0$), согласно формуле (5), $v_x = y/H$, тогда $p = C/H$, $C = \tilde{h}_0^{*} = 1$. Используя формулу (8) с учетом $h(x)=0$ для $H(x)$ и $p(x)$, получим следующие выражения:

$$H(x) = \sqrt{1+2Kx}, \quad p = \frac{1}{\sqrt{1+2Kx}}. \qquad (26)$$

Зависимости толщины смазочной пленки, обусловленной расплавом, а также давления от координаты x соответственно приведены на рис. 2 и 3 для случая, когда $\frac{4\mu u^* h_0}{L^* L} < 1$, $\frac{4\mu u^* h_0}{L^* L} > 1$.

В случае, когда поверхности направляющей и ползуна расположены под углом ($h(x) \neq 0$).

Используя приближенную формулу (10) для $H(x)$, будем иметь

$$H(x) = \tilde{h}_0^* + \frac{K}{1+\tilde{h}_0^*}\left(x - \tilde{\eta}\frac{x^2}{2} + \tilde{\eta}^2\frac{x^3}{3}\right), \quad \tilde{h}_0^* < 1. \qquad (27)$$

С учетом формулы (7) для гидродинамического давления будем иметь:

$$p(x) = \frac{2C}{\left(1+\tilde{h}_0^*\right)\left(1+\tilde{\eta}x\right) + \frac{K}{1+\tilde{h}_0^*}\left(x - \tilde{\eta}\frac{x^2}{2} + \tilde{\eta}^2\frac{x^3}{3}\right)},$$

$$C = \frac{1+\tilde{h}_0^*}{2}, \quad \tilde{\eta} = \frac{\eta}{1+\tilde{h}_0^*}. \qquad (28)$$

Из приведенных на рис. 4—5 зависимостей, полученных на основе формул (27) и (28), следует, что и в рассматриваемом случае, когда $h(x) \neq 0$, эти зависимости имеют такую же закономерность, как зависимости, приведенные на рис. 2 и 3.

Выводы. На основе теоретического исследования и численного анализа можно заключить:

1. С увеличением значений параметра, обусловленных расплавом, происходит резкое снижение силы трения. При этом несущая способность снижается незначительно.

2. При значении параметра $2K > 1$ толщина расплавленной пленки и давление, в зависимости от координаты x, растет и убывает, соответственно, значительно быстрее, чем при $2K < 1$.

Заключение. Теоретическая и практическая значимость работы состоит в подтверждении экспериментальных и теоретических исследований упорных подшипников скольжения, эффективности полученного комплекса уточненных моделей, позволяющего выполнять как предпроектные оценочные, так и проектировочные инженерные расчеты в широком диапазоне эксплуатационных нагрузочно-скоростных режимов.

На основе экспериментального исследования установлено, что после прекращения подачи истинно вязкого смазочного материала аварийный ресурс покрытия из легкоплавкого металла составил от 6,85 до 76,98 минуты, т.е. ресурс на 24—30 % больше.

Библиографический список

1. Шаповалов В. В., Озябкин А. Л., Харламов П. В. Применение методов физико-математического моделирования и трибоспектральной идентификации для мониторинга фрикционных механических систем // Вестник машиностроения. 2009. № 5. С. 49—57.
2. Шаповалов В. В., Челохьян А. В., Колесников И. В. [и др.]. Амплитудо-фазочастотный анализ критических состояний фрикционных систем: моногр. Москва, 2010. 383 с. ISBN 978-5-9994-0021-5.
3. Zadorozhnaya E. A., Hudyakov V., Dolgushin I. Evaluation of Thermal Condition of Turbocharger Rotor Bearing // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2020. P. 1183—1193. DOI: 10.1007/978-3-030-22041-9_123.
4. Levanov I. G., Zadorozhnaya E. A., Mukhortov I. V., Eschiganov M. O. Study of effect of metal oleates on mixed and boundary lubrication // Tribology in Industry. 2020. Vol. 42 (3). P. 461—467. DOI: 10.24874/ti.708.06.19.08.
5. Kandeva M., Rozhdestvensky Y. V., Svoboda P., Kalitchin Z., Zadorozhnaya E. A. Influence of the size of silicon carbide nanoparticles on the abrasive wear of electroless nickel coatings. Part 2 // Journal of Environmental Protection and Ecology. 2020. Vol. 21 (1). P. 222—233.
6. Zadorozhnaya E. A., Levanov I. G., Kandeva M. Tribological research of biodegradable lubricants for friction units of machines and mechanisms: Current state of research // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2019. P. 939—947. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_98.
7. Levanov I. G., Zadorozhnaya E., Vichnyakov D. Influence of friction geo-modifiers on HTHS viscosity of motor oils // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2019. P. 967—972. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_101.
8. Mukhortov I. V., Zadorozhnaya E. A, Kandeva M., Levanov I. G. Studying the possibility of using complex esters as AW/EP additives // Tribology in Industry. 2019. Vol. 41 (3). P. 355—364. DOI: 10.24874/ti.2019.41.03.05.
9. Ахвердиев К. С., Александрова Е. В., Кручинина Е. В., Мукутадзе М. А. Стратифицированное течение двухслойной смазки в зазоре упорного подшипника, обладающего повышенной несущей способностью // Вестник ДГТУ. 2010. Т. 10, № 2 (44). С. 529—536.
10. Ахвердиев К. С., Александрова Е. Е., Мукутадзе М. А. Стратифицированное течение двухслойной смазки в зазоре сложнонагруженного радиального подшипника конечной длины, обладающего повышенной несущей способностью // Вестник РГУПС. 2010. № 1 (37). С. 132—137.
11. Ахвердиев К. С., Мукутадзе М. А., Александрова Е. Е., Эркенов А. Ч. Математическая модель стратифицированного течения двухслойной смазочной композиции в радиальном подшипнике с повышенной несущей способностью с учетом теплообмена // Вестник РГУПС. 2011. № 1 (41). С. 160—165.
12. Ахвердиев К. С., Вовк А. Ю., Мукутадзе М. А., Савенкова М. А. Аналитический метод прогнозирования значений критериев микрополярной смазки, обеспечивающих устойчивый режим работы радиального подшипника скольжения // Трение и износ. 2008. Т. 29. С. 184—191.
13. Mukutadze M. A., Vasilenko V. V., Mukutadze A. M., Opatskikh A. N. Mathematical model of a plain bearer lubricated with molten metal // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 378. 012021. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012021.
14. Мукутадзе М. А., Хасьянова Д. У., Мукутадзе А. М. Гидродинамическая модель клиновидной опоры скольжения с легкоплавким металлическим покрытием // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. № 4. С. 51—58. DOI: 10.31857/S0235711920040100.
15. Mukutadze M. A., Khasyanova D. U. Radial Friction Bearing with a Fusible Coating in the Turbulent Friction Mode // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2019. Vol. 48 (5). P. 423—432. DOI: 10.3103/S1052618819050066.
16. Mukutadze M. A., Mukutadze A. M., Opatskikh A. N. V-shaped sliding bearings using micropolar lubricants caused by a melt accounting for the dependence of lubricant viscosity and porous lauer permeability on pressure // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1353. 012025. DOI: 10.1088/1742-6596/1353/1/012025.
17. Kolesnikov I. V., Mukutadze A. M., Avilov V. V. Ways of Increasing Wear Resistance and Damping Properties of Radial Bearings with Forced Lubricant supply // Proceedings Engineering. 2019. P. 1049—1062. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_110.
18. Mukutadze M. A. Radial bearing with porous Elements // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. P. 559—570. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.041.
19. Mukutadze A. M. Coefficient of a rolling motion bearing drive // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. P. 547—558. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.040.
20. Mukutadze M. A., Mukutadze A. M., Vasilenko V. V. Simulation model of thrust bearing with a free-melting and porous coating of guide and slide surfaces // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 560. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012031.

АХВЕРДИЕВ Камил Самедович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Высшая математика».
AuthorID (РИНЦ): 174546
AuthorID (SCOPUS): 6701814894
ORCID: 0000-0002-5062-2612
Адрес для переписки: vm@rgups.ru
БОЛГОВА Екатерина Александровна, аспирант кафедры «Высшая математика».
ORCID: 0000-0002-0737-1846
Адрес для переписки: bolgova_katya6@mail.ru
ЛАГУНОВА Елена Олеговна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Высшая математика».
ORCID: 0000-0002-2762-8068
Адрес для переписки: lagunova@rambler.ru
КУМАНИН Станислав Витальевич, аспирант кафедры «Высшая математика».
Адрес для переписки: stanislav.kum@mail.ru

Для цитирования

Ахвердиев К. С., Болгова Е. А., Лагунова Е. О., Куманин С. В. Гидродинамический расчет клиновидной системы «ползун—направляющая», работающей на сжимаемом смазочном материале в условиях наличия расплава на поверхности направляющей // Омский научный вестник. 2021. № 2 (176). С. 10—14. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-176-10-14.

Статья поступила в редакцию 15.02.2021 г.

© К. С. Ахвердиев, Е. А. Болгова, Е. О. Лагунова, С. В. Куманин