

## РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ФЕРРОМАГНИТНОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА В КЛИНОВИДНОЙ ОПОРЕ СКОЛЬЖЕНИЯ С НЕСТАНДАРТНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Научная статья

Куманин С.В.<sup>1,\*</sup>, Ахвердиев К.С.<sup>2</sup><sup>1</sup> ORCID : 0000-0003-3914-6800;<sup>2</sup> ORCID : 0000-0002-5062-2612;<sup>1,2</sup> Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (kafedra.zdv.rgups[at]mail.ru)

**Аннотация**

В работе приводится методика формирования расчетной модели упорного подшипника скольжения с нестандартной опорной поверхностью и плавким покрытием поверхности опорного кольца. Рассматривается случай, когда в качестве модели гидродинамического смазывания используется сжимаемая ферромагнитная жидкость и расплав покрытия, обладающий аналогичными реологическими свойствами, при наличии электромагнитного поля. В результате получены аналитические выражения для несущей способности подшипника и для силы трения. Дана оценка влияния параметров, характеризующих адаптированный к условиям трения (нелинейный) и упругодеформированный контур опорной поверхности подшипника, а также параметра, обусловленного наличием расплава, на основные рабочие характеристики подшипника.

**Ключевые слова:** упорный подшипник, покрытие поверхности опорного кольца, податливая опорная поверхность ползуна, гидродинамический режим.

## A CALCULATION MODEL OF FERROMAGNETIC LUBRICANT IN A SLIDING KNIFE EDGE WITH A NON-STANDARD SURFACE

Research article

Kumanin S.V.<sup>1,\*</sup>, Akhverdiev K.S.<sup>2</sup><sup>1</sup> ORCID : 0000-0003-3914-6800;<sup>2</sup> ORCID : 0000-0002-5062-2612;<sup>1,2</sup> Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

\* Corresponding author (kafedra.zdv.rgups[at]mail.ru)

**Abstract**

The work presents a methodology for the formation of a calculation model of a thrust sliding bearing with a non-standard bearing area and a fusible rim surfacing. The case is examined when a compressible ferromagnetic fluid and a coating melt having similar rheological properties are used as a hydrodynamic lubrication model in the presence of an electromagnetic field. As a result, analytical expressions for bearing capacity and for friction force have been obtained. The influence of parameters characterizing the adapted friction (nonlinear) and elastically deformed contour of bearing support area as well as the parameter conditioned by the presence of melt on the main operational characteristics of the bearing are evaluated.

**Keywords:** thrust bearing, support rim surfacing, pliable ram bearing area, hydrodynamic mode.

**Введение**

Без использования надежной и высокопроизводительной техники в машиностроении, авиастроении, приборостроении и т.д., которое можно достичь за счет создания механизмов на стадии проектирования для принятия принципиальных решений о конструктивном исполнении деталей и их сопряжений, применяемых материалов, невозможно обеспечить необходимый уровень надежности.

Повышение ресурса подшипников скольжения является важной задачей, имеющей большое экономическое значение. В связи с этим вызывает интерес использование в качестве модели гидродинамического смазывания жидкий смазочный материал и расплав покрытия контактных поверхностей.

Работы [1], [3], [5], [8] посвященные гидродинамическому расчету трибосистем с учетом реологических свойств, применяемых смазочных материалов, обладающих Ньютонскими или Неньютонскими свойствами при ламинарном и турбулентном режиме течения для увеличения гидродинамического режима смазывания для различных условий эксплуатации, доказывает необходимость учета дополнительных факторов.

Анализируя работы [9], [11], [13], [14] трибосистем с покрытиями из различных антифрикционных композитов, с учетом стратификации жидкого смазочного материала, а также исследований [15], [16], [17], [18] трибосистем с нестандартным профилем на рабочей поверхности выявлено, что учет вышеперечисленных факторов улучшает вибропоглощающие свойства подшипников скольжения и снижает их температуру. Установлено, что при учете варьирования вида конструкции подшипника и антифрикционного покрытия можно разработать эффективные конструкции для применения в трибоузлах машин и механизмов.

Для уменьшения износа в работах [19], [21], [22], [24] проведено исследование трибосистем с легкоплавким металлическим покрытием с учетом реологических свойств применяемого смазочного материала и расплава покрытия, при ламинарном и турбулентном режимах течения смазочного материала, позволяющее эффективно управлять показателями надежности и долговечности трибоузлов для различных условий эксплуатации.

Настоящее исследование посвящено расширению области применения путем разработки математических моделей клиновидной опоры скольжения, учитывающей дополнительные факторы: сжимаемость, антифрикционное покрытие,

электропроводность, упругая опорная поверхность ползуна, адаптированный к условиям трения опорный профиль ползуна, а также расплав покрытия для различных условий эксплуатации.

### Постановка задачи

Рассматривается установившееся течение сжимаемой ферромагнитной жидкости в зазоре клиновидной опоры скольжения, ползун с нестандартным профилем неподвижен, а опорное кольцо с покрытием движется в сторону сужения зазора со скоростью  $u^*$  (см. рисунок). Помимо этого, предполагается, что адаптированный контур ползуна является также нелинейным.

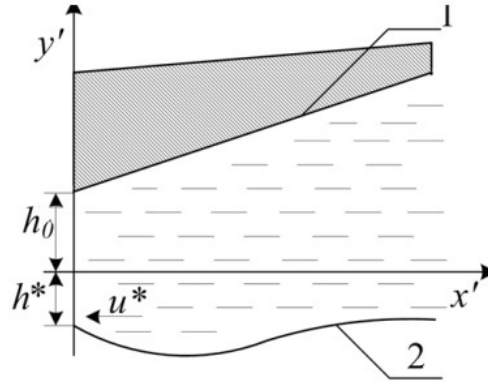


Рисунок 1 - Расчетная схема:

1 - контур ползуна; 2 - расплавленный контур направляющей

Уравнения контуров 1–5 соответственно характеризуют:

- 1) контур ползуна, прилегающий к жесткой опорной поверхности;
- 2) деформированный контур ползуна;
- 3) недеформированный контур ползуна;
- 4) направляющей до расплава;
- 5) контур направляющей после расплава. Уравнения этих контуров запишем в виде:

$$\begin{aligned}
 & y' = h_1 + x' \operatorname{tg} \alpha; \quad 2) y' = h_0 + x' \operatorname{tg} \alpha - a' \sin \omega' x' + \beta' \varphi' \left( \frac{x'}{e} \right); \quad 3) y' = h_0 + x' \operatorname{tg} \alpha - a' \sin \omega' x'; \quad 4) y' = 0, \\
 & \qquad \qquad \qquad 5) y' = \beta' \varphi' \left( \frac{x'}{e} \right).
 \end{aligned} \tag{1}$$

Где функция  $\beta' \varphi' \left( \frac{x'}{e} \right)$  подлежит определению.

Будем исходить из следующих базовых уравнений: уравнения движения сжимаемой ферромагнитной жидкости, уравнения неразрывности, уравнения состояния, уравнения Ламэ, а также уравнения, описывающего расплавленный контур направляющей. К этим уравнениям необходимо также добавить уравнение Максвелла. Указанная система уравнений в системе координат  $x'Oy'$  запишется в виде:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\mu \partial^2 v'_{x'}}{\partial y'^2} + \sigma' B' (E'_{z'} - B y'_{y'} v'_{x'}) = \frac{dp'}{dx'}; \quad \frac{\partial}{\partial y'} (\rho v'_{x'}) + \frac{\partial}{\partial y'} (\rho v'_{y'}) = 0; \quad \rho = f(p'); \\
 & (\tilde{\lambda} + G) \frac{\partial \xi}{\partial x'} + G \Delta u'_{x'} = 0; \quad (\tilde{\lambda} + G) \frac{\partial \xi}{\partial y'} + G \Delta u'_{y'} = 0; \\
 & u^* L' \frac{d\mu'(x')}{dx'} = 2\mu \int_{-\mu'(x')}^{h(x')} \left( \frac{\partial v'_{x'}}{\partial y'} \right) dy', \quad \operatorname{div} \bar{B} = 0, \quad \operatorname{rot} \bar{E} = 0, \\
 & \text{где } \xi = \frac{\partial u'_{x'}}{\partial x'} + \frac{\partial u'_{y'}}{\partial y'} + \frac{\partial u'_{z'}}{\partial z'}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Предполагается, что скорость движения опорного кольца достаточно большая, а поверхность рассматриваемого ползуна – шероховатая. Такая система соответствует квадратичной области движения смазочного материала, в которой потери давления на трение пропорциональны квадрату скорости скольжения

$$p' = \frac{\lambda L u^2 \rho'}{2h_0} \tag{3}$$

где  $L$  – длина ползуна;  $u^*$  – скорость скольжения направляющей;  $\lambda$  – коэффициент потерь на трение, находится по формуле Шифринсона  $\lambda = 0,11 \delta^*/h_0$ ,  $\delta^* = 0,005$  мм – высота шероховатости ползуна.

Для удобства решения переходим к безразмерным величинам:

а) в смазочном слое:

$$\begin{aligned}
v'_{x'} &= u^* v, & v'_{y'} &= \xi^* u^* u, & \xi &= \frac{h_0}{L}; & x' &= Lx; & y' &= h_0 y; \\
p' &= p^* p, & \rho' &= \rho^* \rho, & \rho^* &= \frac{2h_0 p a}{\lambda \cdot L u^*}, & p &= \rho; \\
B_{y'} &= B B^*; & E_{z'} &= E.
\end{aligned} \tag{4}$$

в) в упругом слое

$$y' = (h_1 - h_0) y^*; \quad x' = L^* x; \quad u'_{y'} = \tilde{u}^* u_y; \quad u'_{x'} = \tilde{u}^* u_x, \tag{5}$$

где  $\tilde{u}^*$  – характеризует величину компонента вектора перемещения.

Подставляя (4) и (5) в (2), будем иметь:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} - N B^2 v + A B &= \frac{1}{\Lambda} \frac{c p}{dx}; \quad \frac{\partial}{\partial x}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u) = 0, \quad p = \rho; \\
\frac{dH}{dx} &= -K \int_{-H(x)}^{h(x)} \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 dy; \\
\frac{\partial^2 u_y}{\partial y^{*2}} &= 0; \quad \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^*} = 0.
\end{aligned} \tag{6}$$

Здесь  $K = \frac{2\mu u^*}{h_0 L'}$ ;  $h(x) = 1 + \eta x - \eta_1 \sin \omega x + \eta_2 \Phi(x)$ ;

$$\eta = \frac{L \operatorname{tg} \alpha}{h_0}; \quad \eta_1 = \frac{a'}{h_0}; \quad \eta_2 = \frac{b'}{h_0}; \quad N = \frac{h_0^2 \sigma B^2}{\mu}; \quad A = \frac{\sigma B^4 L h_0^2}{\mu u^*}.$$

В начале решаем задачу для экстремального случая, когда  $L' \rightarrow \infty \Leftrightarrow K \rightarrow 0$ . В этом случае  $H(x) = h_0^*$ . В дальнейшем в первом уравнении системы (6) заменим значение скорости ее максимальным значением ( $v = -1$ ).

Систему уравнений (6) решаем при общепринятых граничных условиях:

$$\begin{aligned}
u &= 0, \quad v = 0 \quad \text{при} \quad y = h(x); \\
w_x &= 0, \quad u_y = 0 \quad \text{при} \quad y^* = h_2(x); \\
u &= 0, \quad v = -1 \quad \text{при} \quad y = \eta_3 \varphi(x); \\
M \frac{\partial u_y}{\partial y^*} \Big|_{y^* = h(x)} &= -\tilde{p},
\end{aligned} \tag{7}$$

где  $\eta_3 = \frac{\beta'}{h_0}$ ;  $M = \frac{G(1+\alpha^*)\tilde{u}^* h_0}{(1-\alpha^*)u^* \mu \delta_1}$ ;

$$h_1(x) = \frac{h_0}{\delta_1} + \eta_4 x - \eta_5 \sin \omega x;$$

$$h_2(x) = \frac{h_1}{\delta_1} + \eta_4 x; \quad \eta_4 = \frac{L \operatorname{tg} \alpha}{h_1}; \quad \eta_5 = \frac{a'}{l_1};$$

$\alpha^*$  – постоянная Мусхелишвили;

$$\tilde{p} = \max_{x \in [0,1]} p.$$

Далее решаем задачу (6)–(7) для случая, когда  $L' \rightarrow \infty \Leftrightarrow K \rightarrow 0$ . В этом предельном случае имеем:

$$H(x) = h_0^*; \quad h(x) = 1 + \eta x - \eta_1 \sin \omega x + \frac{\tilde{p}}{M}. \tag{8}$$

С учетом (8) точное автомодельное решение задачи (6)–(7) будем искать в виде:

$$\begin{aligned}
\rho v &= \frac{\partial \psi}{\partial y} + V(x, y); \quad \rho u = -\frac{\partial \psi}{\partial x} + U(x, y) \\
\psi &= \tilde{\psi}(\xi), \quad V = \tilde{v}(\xi) \cdot p, \quad U(x, y) = p \tilde{u}(\xi, x) \cdot h'(x); \\
\xi &= \frac{y - h_0^*}{\tilde{h}(x)}; \quad \frac{p}{\Lambda} \frac{dp}{dx} - \tilde{\Delta} = \frac{p \tilde{c}_1}{\tilde{h}^2} + \frac{\tilde{c}_2}{\tilde{h}^3}; \\
\tilde{h}(x) &= 1 + \eta x - \eta_1 \sin \omega x + \frac{\tilde{p}}{M} - h_0^*.
\end{aligned} \tag{9}$$

Подставляем (9) в (6) и (7), будем иметь:

$$\tilde{\psi}' = \frac{\tilde{c}_2}{2} (\xi^2 - \xi); \quad \tilde{v}(\xi) = \tilde{c}_1 + - \left( 1 - \frac{\tilde{c}_1}{2} \right) \xi - 1, \quad \tilde{c}_1 = -6. \tag{10}$$

Для нахождения давления  $p$  получаем аналитическое выражение:

$$p = \int_0^x \left[ \frac{\tilde{\Delta} \Lambda}{p} + \Lambda \left[ \frac{\tilde{c}_1}{(1-h_0^* + \frac{\tilde{p}}{M})^2 (1+\eta x - \eta_1 \sin \omega x)^2} + \frac{\tilde{c}_2}{(1-h_0^* + \frac{\tilde{p}}{M})^3 (1+\eta x - \eta_1 \sin \omega x)^3} \right] dx + 1 \right]. \tag{11}$$

Используя метод последовательных приближений для (11) имеем:

$$p_1 = 1;$$

$$p_2 = \frac{\tilde{c}_1 \Lambda}{\left(1 - h_0^* + \frac{\tilde{p}}{M}\right)} \left( \frac{\tilde{\eta}}{2} (x^2 - x) - \frac{3\tilde{\eta}_1 x}{\omega} (\cos \omega - 1) + \frac{3\eta_1}{\omega} (\cos \omega x - 1) + \right. \\ \left. + \frac{2\eta_1 x}{\omega} (\cos \omega - 1) - \frac{2\eta_1}{\omega} (\cos \omega - 1) \right) + \tilde{\Delta} \Lambda \left( \frac{3}{2} \tilde{\eta} x^2 - \frac{3}{2} \tilde{\eta} x - \right. \\ \left. - \frac{3\tilde{\eta}_1 x}{\omega} (\cos \omega - 1) + \frac{3\eta_1}{\omega} (\cos \omega x - 1) \right) + 1. \quad (12)$$

Используя (10) и (12), для несущей способности и силы трения получим выражения вида

$$W = p^* L \int_0^1 (p - 1) dx = \frac{6\Lambda}{\left(1 - h_0^* + \frac{\tilde{p}}{M}\right)^2} \left( -\frac{\tilde{\eta}}{6} + \frac{\tilde{\eta}_1}{2\omega} (\cos \omega - 1) + \right. \\ \left. + \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} \left( \frac{\sin \omega}{\omega} - 1 \right) \right) + \Lambda \tilde{\Delta} \left( \frac{\tilde{\eta}}{4} - \frac{3\eta_1}{2\omega} (\cos \omega - 1) + \frac{3\eta_1}{\omega} \left( \frac{\sin \omega}{\omega} - 1 \right) \right) \\ L_{\text{тр}} = \frac{u^4 L}{h_0} \int_0^1 \left( \frac{\Psi''(0)}{\hat{h}^2 \tilde{p}} + \frac{\tilde{v}'(0)}{\tilde{h}} \right) dx = \quad (13) \\ = \frac{\tilde{c}_2}{2 \left(1 - h_0^* + \frac{\tilde{p}}{M}\right)^2} \left( 1 - \tilde{\eta} - 2\tilde{\eta}_1 \frac{\cos \omega}{\omega} + \frac{2\tilde{\eta}_1}{\omega} \right) + \\ + \frac{4}{\left(1 - h_0^* + \frac{\tilde{p}}{M}\right)^2} \left( 1 - \frac{\tilde{\eta}}{2} - \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} \cos \omega + \frac{\eta_1}{\omega} \right).$$

В заключение отметим, что при промежуточных значениях удельной теплоты плавления (т. е.  $L' \rightarrow \infty$ ) формула (13) остается в силе и в рассматриваемом случае, если  $h_0^*$  заменим на  $\tilde{h}_0^*$ .

Численный анализ по результатам теоретического исследования проведен для значений  $r = 20$  мм;  $V = 1-3$  м/с;  $\sigma = 4,1-28,5$  МПа;  $\mu_0 = 0,0707-0,0076$  Н·с/м<sup>2</sup>.

Триботехнические экспериментальные исследования упорных подшипников были проведены на специальном стенде для триботехнических исследований (модель НС12).

Конструкция образцов для экспериментальных исследований упорных подшипников скольжения состоит из плоской опоры и сопрягаемого с ней контртела. Опора имеет покрытие рабочей поверхности из металлического сплава Вуда.

Таблица 1 - Сравнительный анализ результатов исследования ползуна с металлическим покрытием клиновидной опоры скольжения с нестандартной поверхностью

№	Теоретическое исследование			Экспериментальное исследование		
	Метал. покрытие	Покрытие и упругая опорная поверхность	Упругоадап тированная опорная поверхность с покрытием	Метал. покрытие	Покрытие и податл. опорная поверхность	Упругоадап тированная опорная поверхность с покрытием
1	0,021	0,0227	0,02	0,0174	0,0149	0,0133
2	0,0193	0,0168	0,0158	0,0109	0,0077	0,0061
3	0,00165	0,00146	0,00136	0,0086	0,0068	0,0054
4	0,00180	0,00156	0,00142	0,0112	0,0087	0,0069
5	0,0022	0,00189	0,00161	0,0142	0,0113	0,0099

### Заключение

1. Получена новая математическая модель, позволяющая установить основные закономерности процессов трения и изнашивания клиновидной опоры скольжения с металлическим покрытием поверхности опорного кольца и нелинейным адаптированным контуром ползуна при учете сжимаемости смазочного материала и электропроводности ферромагнитного смазочного материала.

2. В результате численного анализа установлено, что применение таких подшипников с учетом вышеперечисленных факторов (сжимаемость, электропроводность, реологические свойства смазочного материала и расплава покрытия) повышает несущую способность (на 11–12 %), а коэффициент трения снижается на 9–11 %.

3. Триботехнические испытания на торцевой машине трения показали значительное (до 24 %) уменьшение пятна износа и более длительное (до 32 %) сохранение гидродинамического режима в присутствии покрытия на поверхности направляющей и упруго-адаптированного профиля ползуна по сравнению с исходным смазочным материалом.

**Условные обозначения:**

$L'$  – удельная теплота плавления на единицу объема;  $v'_x, v'_y$  – компоненты вектора скорости;  $p'$  – гидродинамическое давление;  $\rho'$  – плотность;  $\sigma'$  – электропроводность;  $\vec{B} = \{0 : B_y' : 0\}$  – вектор магнитной индукции;  $\vec{E} = \{0 : 0 : E_z'\}$  – вектор напряженности электрического поля;  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $u'_{x'}, u'_{y'}$  – компоненты вектора переменных;  $\tilde{\lambda}$  – постоянная Ламэ;  $G$  – модуль сдвига.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Рецензия**

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Review**

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

**Список литературы / References**

1. Ахвердиев К.С. Гидродинамический расчет радиального подшипника при наличии электромагнитного поля с учетом зависимости вязкости и электропроводимости от температуры / К.С. Ахвердиев, Е.О. Лагунова, М.А. Мукутадзе // Вестник Донского государственного технического университета. — 2009. — Т. 9. — 3(42). — с. 529-536.
2. Ахвердиев К.С. Расчетная модель радиального подшипника скольжения с повышенной несущей способностью, работающего на микрополярной смазке с учетом ее вязкостных характеристик от давления / К.С. Ахвердиев и др. // Инженерный вестник Дона. — 2013. — 4(27). — с. 22.
3. Ахвердиев К.С. Гидродинамический расчет радиального подшипника, работающего в нестационарном режиме на вязкопластичной смазке, обладающей микрополярными свойствами / К.С. Ахвердиев и др. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2008. — 4(32). — с. 131-138.
4. Ахвердиев К.С. Математическая модель гидродинамической смазки радиального подшипника, работающего в нестационарном режиме на микрополярной смазке / К. С. Ахвердиев и др. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2008. — 1(29). — с. 147-151.
5. Ахвердиев К.С. Гидродинамический расчет радиального подшипника скольжения, работающего в турбулентном режиме трения при неполном заполнении зазора вязкоупругой смазкой / К. С. Ахвердиев и др. // Вестник машиностроения. — 2009. — 7. — с. 11-17.
6. Mukutadze M.A. Working out of an analytical model of an axial bearing taking into account dependence of viscous characteristics of micropolar lubrication on pressure and temperature / M.A. Mukutadze, E.O. Lagunova, K.S. Solop // International Journal of Applied Engineering Research. — 2017. — Vol. 12. — 14. — p. 4644-4650.
7. Ахвердиев К.С. Гидродинамический расчет упорного подшипника скольжения, работающего на вязкоупругой смазке в турбулентном режиме трения / К.С. Ахвердиев, М.А. Мукутадзе, И.С. Семенко // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2011. — 4. — с. 69-77.
8. Ахвердиев К.С. Аналитический метод прогнозирования значений критериев микрополярной смазки, обеспечивающих устойчивый режим работы радиального подшипника скольжения / К.С. Ахвердиев и др. // Трение и износ. — 2008. — Т. 29. — 2. — с. 184-191.
9. Mukutadze M.A. Mathematical model of a plain bearer lubricated with molten metal / M.A. Mukutadze et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering 2019. — 2019. — p. 012021.
10. Ахвердиев К.С. Разработка расчетной модели радиального подшипника с учетом зависимости проницаемости, электропроводности и вязкости жидкого смазочного материала от давления / К.С. Ахвердиев и др. // Интернет-журнал Науковедение. — 2016. — Т. 8. — 6(37). — с. 74.
11. Ахвердиев К.С. Стратифицированное течение двухслойной смазки в зазоре упорного подшипника, обладающего повышенной несущей способностью / К.С. Ахвердиев и др. // Вестник Донского государственного технического университета. — 2010. — Т. 10. — 2(45). — с. 217—223.
12. Кохановский В.А. Матричные материалы антифрикционных композитов / В.А. Кохановский, М.А. Мукутадзе // Вестник Донского государственного технического университета. — 2001. — Т. 1. — 2. — с. 51-56.
13. Ахвердиев К.С. Стратифицированное течение трехслойной смазки в зазоре упорного подшипника, обладающего повышенной несущей способностью / К.С. Ахвердиев и др. // Трибология и надежность: сборник научных трудов X Международной конференции. — Санкт-Петербург, 2010. — с. 15-24.
14. Ахвердиев К.С. Расчетная модель упорного подшипника скольжения с повышенной несущей способностью, работающего на неньютоновских смазочных материалах с адаптированной опорной поверхностью / К.С. Ахвердиев и др. // Инженерный вестник Дона. — 2013. — 4(27). — с. 23.
15. Мукутадзе М.А. Радиальный подшипник скольжения с податливой опорной поверхностью / М.А. Мукутадзе и др. // Вестник машиностроения. — 2017. — 12. — с. 33-38.
16. Гармонина А.Н. Расчетная модель радиального подшипника с двухслойным пористым покрытием на поверхности вала, работающего на электропроводящем смазочном материале / А.Н. Гармонина, М.А. Мукутадзе, В.М. Приходько // Инженерный вестник Дона. — 2017. — 3(46). — с. 49.

17. Мукутадзе М.А. Расчетная модель упорного подшипника с пористым покрытием на поверхности направляющей / М.А. Мукутадзе, А.Н. Гармоница, В.М. Приходько // Вестник Донского государственного технического университета. — 2017. — Т. 17. — 3(90). — с. 70-77.
18. Мукутадзе М.А. Гидродинамический расчет упорного подшипника с нежесткой опорной поверхностью / М.А. Мукутадзе и др. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2017. — 1(65). — с. 128-137.
19. Лагунова Е.О. Расчет радиального подшипника скольжения с легкоплавким покрытием / Е.О. Лагунова, М.А. Мукутадзе // Трение и износ. — 2019. — Т. 40. — 1. — с. 112-120.
20. Мукутадзе М.А. Гидродинамическая модель клиновидной опоры скольжения с легкоплавким металлическим покрытием / М.А. Мукутадзе, Д.У. Хасьянова, А.М. Мукутадзе // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2020. — 4. — с. 51-58.
21. Mukutadze M.A. Simulation model of thrust bearing with a free-melting and porous coating of guide and slide surfaces / M.A. Mukutadze, A.M. Mukutadze, V.V. Vasilenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — Novosibirsk, 2019. — p. 012031.
22. Мукутадзе М.А. Радиальный подшипник скольжения в турбулентном режиме трения с легкоплавким покрытием / М.А. Мукутадзе, Д.У. Хасьянова // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2019. — 5. — с. 48-58.
23. Василенко В.В. Гидродинамический расчет радиального подшипника, смазываемого расплавом легкоплавкого покрытия при наличии смазочного материала / В.В. Василенко, Е.О. Лагунова, М.А. Мукутадзе // Науковедение. — 2017. — Т. 9. — 5. — с. 16.
24. Мукутадзе М.А. Разработка расчетной модели гидродинамического смазочного материала, образующегося при плавлении подпятника, при наличии принудительной смазки / М.А. Мукутадзе, Е.О. Лагунова, В.В. Василенко // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2018. — 3. — с. 76-83.

### **Список литературы на английском языке / References in English**

1. Ahverdiev K.S. Gidrodinamicheskij raschet radial'nogo podshipnika pri nalichii jelektromagnitnogo polja s uchetom zavisimosti vjazkosti i jelektroprovodimosti ot temperatury [A Hydrodynamic Calculation of a Radial Bearing under Electromagnetic Field Considering Viscosity and Electrical Conductivity Dependence on Temperature] / K.S. Ahverdiev, E.O. Lagunova, M.A. Mukutadze // Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta [Bulletin of the Don State Technical University]. — 2009. — Vol. 9. — 3(42). — p. 529-536. [in Russian]
2. Ahverdiev K.S. Raschetnaja model' radial'nogo podshipnika skol'zhenija s povyšhennoj nesushhej sposobnost'ju, rabotajushhego na mikropoljarnoj smazke s uchetom ee vjazkostnyh harakteristik ot davlenija [A Calculation Model of a Radial Sliding Bearing with Increased Carrying Capacity, Operating on Micropolar Grease with Consideration of Its Viscosity Characteristics from Pressure] / K.S. Ahverdiev et al. // Inzhenernyj vestnik Dona [Don Engineering Bulletin]. — 2013. — 4(27). — p. 22. [in Russian]
3. Ahverdiev K.S. Gidrodinamicheskij raschet radial'nogo podshipnika, rabotajushhego v nestacionarnom rezhime na vjazkoplachnoj smazke, obladajushhej mikropoljarnymi svojstvami [A Hydrodynamic Calculation of a Radial Bearing Operating in Unsteady Mode with Viscoplastic Grease Possessing Micropolar Properties] / K.S. Ahverdiev et al. // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija [Bulletin of Rostov State University of Railway Transport]. — 2008. — 4(32). — p. 131-138. [in Russian]
4. Ahverdiev K.S. Matematicheskaja model' gidrodinamicheskij smazki radial'nogo podshipnika, rabotajushhego v nestacionarnom rezhime na mikropoljarnoj smazke [A Mathematical model of Hydrodynamic Lubrication of a Radial Bearing Operating in a Non-Stationary Mode on Micropolar Lubrication] / K. S. Ahverdiev et al. // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija [Bulletin of Rostov State University of Railway Transport]. — 2008. — 1(29). — p. 147-151. [in Russian]
5. Ahverdiev K.S. Gidrodinamicheskij raschet radial'nogo podshipnika skol'zhenija, rabotajushhego v turbulentnom rezhime trenija pri nepolnom zapolnenii zazora vjazkouprugoj smazkoj [A Hydrodynamic Calculation of a Radial Sliding Bearing Operating in Turbulent Friction Mode with Incomplete Filling of the Gap with Viscoelastic Lubricant] / K. S. Ahverdiev et al. // Vestnik mashinostroenija [Engineering Bulletin]. — 2009. — 7. — p. 11-17. [in Russian]
6. Mukutadze M.A. Working out of an analytical model of an axial bearing taking into account dependence of viscous characteristics of micropolar lubrication on pressure and temperature / M.A. Mukutadze, E.O. Lagunova, K.S. Solop // International Journal of Applied Engineering Research. — 2017. — Vol. 12. — 14. — p. 4644-4650.
7. Ahverdiev K.S. Gidrodinamicheskij raschet upornogo podshipnika skol'zhenija, rabotajushhego na vjazkouprugoj smazke v turbulentnom rezhime trenija [A Hydrodynamic Calculation of a Thrust Sliding Bearing Operating under Viscoelastic Lubrication in Turbulent Friction Mode] / K.S. Ahverdiev, M.A. Mukutadze, I.S. Semenko // Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin [Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability]. — 2011. — 4. — p. 69-77. [in Russian]
8. Ahverdiev K.S. Analiticheskij metod prognozirovanija znachenij kriteriev mikropoljarnoj smazki, obespechivajushhih ustojchivyy rezhim raboty radial'nogo podshipnika skol'zhenija [The Analytical Method for Predicting the Values of Micropolar Lubrication Criteria to Ensure a Stable Operating Mode of a Radial Sliding Bearing] / K.S. Ahverdiev et al. // Trenie i iznos [Friction and Wear]. — 2008. — Vol. 29. — 2. — p. 184-191.
9. Mukutadze M.A. Mathematical model of a plain bearer lubricated with molten metal / M.A. Mukutadze et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering 2019. — 2019. — p. 012021.
10. Ahverdiev K.S. Razrabotka raschetnoj modeli radial'nogo podshipnika s uchetom zavisimosti pronicaemosti, jelektroprovodnosti i vjazkosti zhidkogo smazochnogo materiala ot davlenija [Development of a Calculation Model of a Radial Bearing Taking into Account the Pressure Dependence of Permeability, Electrical Conductivity and Viscosity of the Liquid]

Lubricant] / K.S. Ahverdiev et al. // Internet-zhurnal Naukovedenie [Internet Journal Sciences]. — 2016. — Vol. 8. — 6(37). — p. 74. [in Russian]

11. Ahverdiev K.S. Stratificirovanoe techenie dvuhslojnoj smazki v zazore upornogo podshipnika, obladajushhego povyshennoj nesushhej sposobnost'ju [Stratified Flow of Double-Layer Grease in the Gap of a Thrust Bearing with Increased Carrying Capacity] / K.S. Ahverdiev et al. // Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta [Bulletin of the Don State Technical University]. — 2010. — Vol. 10. — 2(45). — p. 217—223. [in Russian]

12. Kohanovskij V.A. Matrichnye materialy antifrikcionnyh kompozitov [Matrix Materials of Antifriction Composites] / V.A. Kohanovskij, M.A. Mukutadze // Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta [Bulletin of the Don State Technical University]. — 2001. — Vol. 1. — 2. — p. 51-56. [in Russian]

13. Ahverdiev K.S. Ctraticirovanoe techenie trehslojnoj smazki v zazore upornogo podshipnika, obladajushhego povyshennoj nesushhej sposobnost'ju [Stratified Flow of Three-Layered Grease in a Thrust Bearing Gap with Increased Carrying Capacity] / K.S. Ahverdiev et al. // Tribologija i nadezhnost': sbornik nauchnyh trudov X Mezhdunarodnoj konferencii [Tribology and Reliability: Proceedings of the 10th International Conference]. — Sanit-Petersburg, 2010. — p. 15-24. [in Russian]

14. Ahverdiev K.S. Raschetnaja model' upornogo podshipnika skol'zhenija s povyshennoj nesushhej sposobnost'ju, rabotajushhego na nen'jutonovskih smazochnyh materialah s adaptirovannoj opornoj poverhnost'ju [A Calculation Model of a Thrust Sliding Bearing with Increased Carrying Capacity, Running on Non-Newtonian Lubricants with Adapted Support Surface] / K.S. Ahverdiev et al. // Inzhenernyj vestnik Dona [Don Engineering Bulletin]. — 2013. — 4(27). — p. 23. [in Russian]

15. Mukutadze M.A. Radial'nyj podshipnik skol'zhenija s podatlivom opornoj poverhnost'ju [Radial Plain Bearing with a Compression Bearing Surface] / M.A. Mukutadze et al. // Vestnik mashinostroenija [Engineering Bulletin]. — 2017. — 12. — p. 33-38. [in Russian]

16. Garmonina A.N. Raschetnaja model' radial'nogo podshipnika s dvuhslojnym poristym pokrytiem na poverhnosti vala, rabotajushhego na jelektroprovodjashhem smazochnom materiale [Calculation Model of a Radial Bearing with Double-Layered Porous Coating on a Shaft Surface Running on Electrically Conductive Lubricant] / A.N. Garmonina, M.A. Mukutadze, V.M. Prihod'ko // Inzhenernyj vestnik Dona [Don Engineering Bulletin]. — 2017. — 3(46). — p. 49. [in Russian]

17. Mukutadze M.A. Raschetnaja model' upornogo podshipnika s poristym pokrytiem na poverhnosti napravljajushhej [Calculation Model of a Thrust Bearing with a Porous Coating on the Guide Surface] / M.A. Mukutadze, A.N. Garmonina, V.M. Prihod'ko // Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta [Bulletin of the Don State Technical University]. — 2017. — Vol. 17. — 3(90). — p. 70-77. [in Russian]

18. Mukutadze M.A. Gidrodinamicheskij raschet upornogo podshipnika s nezhestkoj opornoj poverhnost'ju [A Hydrodynamic Calculation of a Thrust Bearing with a Non-Rigid Bearing Surface] / M.A. Mukutadze et al. // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija [Bulletin of Rostov State University of Railway Transport]. — 2017. — 1(65). — p. 128-137. [in Russian]

19. Lagunova E.O. Raschet radial'nogo podshipnika skol'zhenija s legkoplavkim pokrytiem [A Calculation of a Radial Sliding Bearing with a Fusible Coating] / E.O. Lagunova, M.A. Mukutadze // Trenie i iznos [Friction and Wear]. — 2019. — Vol. 40. — 1. — p. 112-120. [in Russian]

20. Mukutadze M.A. Gidrodinamicheskaja model' klinovidnoj opory skol'zhenija s legkoplavkim metallicheskim pokrytiem [A Hydrodynamic Model of the Wedge Sliding Support with a Fusible Metal Coating] / M.A. Mukutadze, D.U. Has'janova, A.M. Mukutadze // Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin [Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability]. — 2020. — 4. — p. 51-58. [in Russian]

21. Mukutadze M.A. Simulation model of thrust bearing with a free-melting and porous coating of guide and slide surfaces / M.A. Mukutadze, A.M. Mukutadze, V.V. Vasilenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — Novosibirsk, 2019. — p. 012031.

22. Mukutadze M.A. Radial'nyj podshipnik skol'zhenija v turbulentnom rezhime trenija s legkoplavkim pokrytiem [Radial Friction Bearings in Turbulent Friction Mode with Fusible Coating] / M.A. Mukutadze, D.U. Has'janova // Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin [Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability]. — 2019. — 5. — p. 48-58. [in Russian]

23. Vasilenko V.V. Gidrodinamicheskij raschet radial'nogo podshipnika, smazyvaemogo rasplavom legkoplavkogo pokrytija pri nalichii smazochnogo materiala [A Hydrodynamic Calculation of a Radial Bearing Lubricated by a Fusible Melt in the Presence of a Lubricant] / V.V. Vasilenko, E.O. Lagunova, M.A. Mukutadze // Naukovedenie [Sciences]. — 2017. — Vol. 9. — 5. — p. 16. [in Russian]

24. Mukutadze M.A. Razrabotka raschetnoj modeli gidrodinamicheskogo smazochnogo materiala, obrazujushhegosja pri plavlennii podpjatnika, pri nalichii prinuditel'noj smazki [Development of a Computational Model of the Hydrodynamic Lubricant Formed during Fusion of a Substick in the Presence of Forced Lubrication] / M.A. Mukutadze, E.O. Lagunova, V.V. Vasilenko // Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin [Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability]. — 2018. — 3. — p. 76-83. [in Russian]