

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.54>

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА С НЕСТАНДАРТНЫМ ОПОРНЫМ ПРОФИЛЕМ И ПОЛИМЕРНЫМ ПОКРЫТИЕМ НА ПОВЕРХНОСТИ ВАЛА ПРИ УЧЕТЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА**

Научная статья

**Бадахов Г.А.<sup>1</sup>, Багрова В.Н.<sup>2</sup>, Морозова А.В.<sup>3</sup>, Мукутадзе М.А.<sup>4</sup>\***

<sup>2</sup> ORCID : 0000-0001-5412-5552;

<sup>3</sup> ORCID : 0000-0001-6657-1883;

<sup>4</sup> ORCID : 0000-0003-2810-3047;

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (murman1963[at]yandex.ru)

**Аннотация**

Статья посвящена анализу модели движения микрополярного смазочного материала в рабочем зазоре радиального подшипника скольжения с нестандартным опорным профилем, имеющим на поверхности вала фторопластсодержащее композиционное полимерное покрытие с канавкой.

Методы исследования: предложены новые модели, описывающие движение смазочного материала в рабочем зазоре радиального подшипника с нестандартным опорным профилем и полимерным покрытием с канавкой на поверхности вала, обладающего при ламинарном режиме движения микрополярными реологическими свойствами, в приближении для «тонкого слоя» и на основе уравнения неразрывности с учетом зависимости вязкости от давления. Выполнен сравнительный анализ полученных результатов теоретического экспериментального исследования радиального подшипника скольжения с нестандартным опорным профилем, имеющим полимерное покрытие с канавкой, без канавки на поверхности вала, и уже имеющихся, подтверждающий приближенность полученной модели к практике.

Новизна работы заключается в разработке методики инженерных расчетов конструкции радиального подшипника скольжения с полимерным покрытием при наличии канавки, позволяющих определить величину основных триботехнических параметров.

В результате исследования достигнуто существенное расширение возможностей, позволяющее провести оценку эксплуатационных характеристик подшипника: величины гидродинамического давления, нагрузочной способности и коэффициента трения.

Выводы: конструкция радиального подшипника с фторопластсодержащим антифрикционным композиционным полимерным покрытием и канавкой шириной 3 мм на поверхности вала обеспечила стабильное всплывание вала на гидродинамическом клине, что экспериментально подтвердило правильность результатов теоретических исследований.

**Ключевые слова:** радиальный подшипник, повышение износостойкости, антифрикционное полимерное композиционное покрытие, канавка, гидродинамический режим, верификация.

**THE DEVELOPMENT OF METHODS TO IMPROVE THE DURABILITY OF A RADIAL BEARING WITH A NON-STANDARD SUPPORT PROFILE AND POLYMER COATING ON THE SHAFT SURFACE TAKING INTO ACCOUNT THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF THE LUBRICANT**

Research article

**Badakhov G.A.<sup>1</sup>, Bagrova V.N.<sup>2</sup>, Morozova A.V.<sup>3</sup>, Mukutadze M.A.<sup>4</sup>\***

<sup>2</sup> ORCID : 0000-0001-5412-5552;

<sup>3</sup> ORCID : 0000-0001-6657-1883;

<sup>4</sup> ORCID : 0000-0003-2810-3047;

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

\* Corresponding author (murman1963[at]yandex.ru)

**Abstract**

The article is dedicated to the analysis of the model of micropolar lubricant movement in the working gap of a radial sliding bearing with a non-standard support profile with a fluoroplastic composite polymer coating with a groove on the shaft surface.

Research methods: new models describing the motion of the lubricant in the working gap of the radial sliding bearing with a non-standard support profile and polymer coating with a groove on the shaft surface, with micropolar rheological properties in laminar mode of motion, in the "thin layer" approximation and based on the continuity equation with the viscosity dependence on pressure are presented. The comparative analysis of the received results of theoretical experimental research of the radial sliding bearing with a non-standard support profile, with a polymeric coating with a groove, without a groove on a shaft surface, and already available, confirming approximation of the obtained model to practice is carried out.

The novelty of the work lies in the development of the methodology for engineering calculations of the design of a radial sliding bearing with polymer coating with a groove, allowing to determine the magnitude of the main tribotechnical parameters.

As a result of the research, a significant enhancement of the capabilities has been achieved, allowing to evaluate the bearing operating characteristics: hydrodynamic pressure value, load capacity and friction coefficient.

Conclusions: The design of the radial bearing with fluoroplastic antifriction composite polymer coating and a 3 mm wide groove on the shaft surface provided stable shaft surfacing on the hydrodynamic wedge, which experimentally confirmed the correctness of the results of the theoretical studies.

**Keywords:** radial bearing, increasing durability, antifriction polymer composite coating, groove, hydrodynamic mode, verification.

### Введение

Цель исследования – установление закономерностей устойчивого гидродинамического режима за счет нанесения на поверхность вала фторопластсодержащего композиционного полимерного материала.

Успешное развитие промышленности невозможно без использования надежной и высокопроизводительной техники. Для устранения этой проблемы необходимо создание машин и механизмов, обладающих высокой износостойкостью и другими эксплуатационными параметрами. Поэтому исследования в данном направлении являются актуальными и востребованными. Известно, что фторопластсодержащие антифрикционные композиционные покрытия обладают высокой несущей способностью и широко применяются в авиакосмической технике при относительно низких скоростях скольжения и значительных нагрузках. Фторопластсодержащее покрытие эффективно работает в условиях граничного трения при самосмазывании полимерным антифрикционным покрытием. Скоростные ограничения связаны с предельной теплостойкостью антифрикционного полимерного композита.

В настоящее время в современной технике появляются и развиваются новые направления, обеспечивающие повышение эксплуатационных параметров подшипников скольжения. К ним относится и смазывание фторопластсодержащим антифрикционным полимерным покрытием контрастных поверхностей. Применение подобных подшипников требует для их проектирования специальных расчетов, для выполнения которых разрабатываются расчетные модели [1].

Для подшипников скольжения, смазываемых антифрикционными полимерными покрытиями в гидродинамическом режиме смазывания, имеется значительное число работ [2], [4], [7], [9], однако для расширения и конкретизации исследований применительно к трибосопряжениям технологических машин, работающих в условиях действия ударных и вибрационных нагрузок, повышенных эксплуатационных и низких климатических температур, абразивного и коррозионно-механического воздействия, наличия химически агрессивных сред, возникает необходимость учета целого ряда особенностей подобных трибосистем [10], [12], [15], [17].

Данное исследование посвящено разработке математической модели подшипников скольжения, учитывающей изложенные выше особенности.

### Постановка задачи

Рассматривается установившееся течение несжимаемой жидкости в рабочем зазоре, обладающей микрополярными реологическими свойствами. Подшипник с некруговым опорным профилем опорной поверхности неподвижен, а вал при наличии полимерного покрытия на его поверхности вращается со скоростью  $\Omega$  [18].

В полярной системе координат (см. рисунок) с полюсом в центре вала уравнение контуров вала с полимерным покрытием  $C_1$ , вала без покрытия (с канавкой)  $C_0$ , подшипниковой втулки с некруговым профилем опорной поверхности  $C_2$  запишутся в виде

$$C_1 : r' = r_0, C_0 : r' = r_0 - \tilde{h}, C_2 : r' = r_1(1 + H) - d \sin \omega \theta, \quad (1)$$

где  $\theta = \varepsilon \theta - \frac{1}{2} \varepsilon^2 \theta^2 + \dots$ ,  $\varepsilon = \frac{e}{r_0}$ ,  $r_0$  – радиус вала с полимерным покрытием;  $r_1$  – радиус подшипниковой втулки;  $e$  – эксцентриситет;  $\varepsilon$  – относительный эксцентриситет;  $\tilde{h}$  – высота канавки;  $a'$  и  $\omega$  – амплитуда возмущения и параметр адаптированного профиля втулки соответственно.

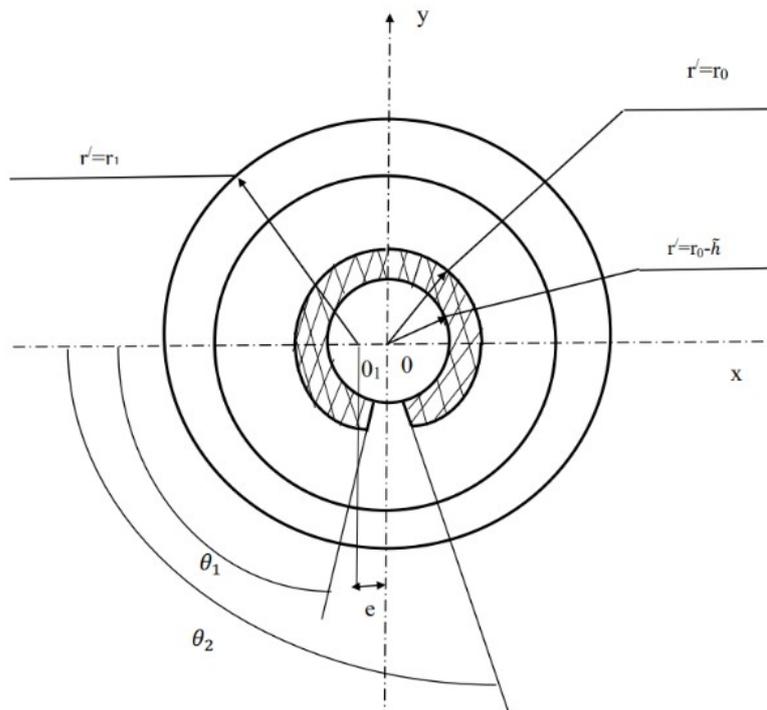


Рисунок 1 - Схема трибоконтакта в радиальном подшипнике скольжения с полимерным композиционным фторопластсодержащим покрытием  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.54.1>

Полагаем, что вязкостные характеристики зависят от давления по закону:

$$\mu' = \mu_0 e^{\alpha' p'}, \quad \kappa' = \kappa_0 e^{\alpha' p'}, \quad \gamma' = \gamma_0 e^{\alpha' p'} \quad (2)$$

где  $\mu'$  – коэффициент динамической вязкости смазочного материала;  $\kappa'$ ,  $\gamma'$  – коэффициенты вязкости микрополярного смазочного материала;  $\mu_0$  – характерная вязкость неньютоновского смазочного материала;  $p'$  – гидродинамическое давление в смазочном слое;  $\alpha'$  – экспериментальная постоянная величина;  $\kappa_0$ ,  $\gamma_0$  – характерная вязкость микрополярного смазочного материала.

Исходными базовыми уравнениями являются уравнение движения несжимаемой микрополярной жидкости для «тонкого слоя» и уравнение неразрывности

$$\frac{\partial p_i}{\partial r'} = 0; \quad (2\mu' + \kappa') \left( \frac{\partial^2 v_{\theta i}}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v_{\theta i}}{\partial r'} \right) = \frac{1}{r'} \frac{dp'_i}{d\theta} - \kappa' \frac{\partial v'_{r'_j}}{\partial r'} \quad (3)$$

$$\gamma' \left( \frac{\partial^2 v'_i}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v'_i}{\partial r'} \right) = \kappa' v'_i + \kappa' \frac{\partial v_{\theta i}}{\partial r'}, \quad \frac{\partial v'_{r'_i}}{\partial r'} + \frac{v'_{r'_i}}{r'} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v_{\theta i}}{\partial \theta} = 0$$

где  $v'_{r'_i}$ ,  $v_{\theta i}$  – компоненты вектора скорости смазочной среды;  $v'_i$  – скорость частиц в микрополярной среде.

Система уравнений (3) решается при следующих граничных условиях:

$$v_{\theta} = 0, \quad v_{r'} = 0 \quad r' = r_1(1 + H) - a' \sin \omega \theta; \quad (4)$$

$$v_{r'} = 0, \quad v_{\theta} = \Omega (r_0 - \tilde{h}) \quad r' = r_1 - \tilde{h};$$

$$v'_{r'} = 0, \quad v_{\theta} = \Omega r_0 \quad r' = r_0;$$

$$p(0) = p(\theta) = p_g; \quad r_0 - \tilde{h} = h^* \quad \theta_1 < \theta < \theta_2,$$

$$r' = (r_0 - \tilde{h}) + \delta r; \quad \delta = r - (r_0 - \tilde{h}); \quad v_r = \Omega \delta u, \quad v_\theta = \Omega v (r_0 - \tilde{h}); \quad (5)$$

$$p' = p^* p; \quad p^* = \frac{(2\mu_0 + \kappa_0)\Omega(r_0 - \tilde{h})^2}{2\delta^2};$$

$$v' = v, \quad \mu' = \mu_0 \mu, \quad \kappa' = \kappa_0 \kappa, \quad \gamma' = \gamma_0 \gamma,$$

$$N^2 = \frac{\kappa_0}{2\mu_0 + \kappa_0}; \quad N = \frac{2\mu_0 l^2}{\delta^2 \kappa_0}; \quad l^2 = \frac{\gamma_0}{\mu_0}.$$

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + N^2 \frac{\partial v_i}{\partial r} = e^{-\alpha p} \frac{dp_i}{d\theta}; \quad \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} = \frac{v_i}{N_1} + \frac{1}{N_1} \frac{du_i}{dr}; \quad \frac{\partial u_i}{\partial \theta} + \frac{\partial v_i}{\partial r} = 0; \quad (6)$$

$$u = 0, \quad v = 0, \quad v = 0 \quad r = 1 + \eta \cos \theta - \eta_1 \sin \omega \theta = h(\theta); \quad (7)$$

$$u = 1, \quad v = 0, \quad v = 1 \quad r = r_0, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi;$$

$$u = 1, \quad v = 0, \quad v = 1 \quad r = r_0 - \tilde{h}, \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2;$$

$$p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{p_0}{p}.$$

С учетом того, что зазор мал и  $v = 0$ , о средним второе уравнение системы (6) по толщине смазочного слоя, в результате уравнение примет вид:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + \frac{N_i^2}{2N_1 h} (2r - h) = e^{-v_i} \frac{dp_i}{d\theta}, \quad v_i = \frac{1}{2N_1 h} (r_i^2 - r_i h_i), \quad \frac{\partial u_i}{\partial r} + \frac{\partial v_i}{\partial \theta} = 0, \quad (8)$$

где  $\eta = \frac{\epsilon}{\delta}$  – конструктивный параметр;  $\eta_1 = \frac{a'}{\delta}$  – конструктивный параметр с учетом адаптированного профиля.

Введем обозначения  $z = e^{-\alpha p}$ , подставим его в уравнение (8), в результате имеем следующую систему уравнений:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + \frac{N_i^2}{2N_1 h} (2r_i - h_i) = -\frac{1}{\alpha} \frac{dz_i}{d\theta}; \quad \frac{\partial u_i}{\partial r} + \frac{\partial v_i}{\partial \theta} = 0; \quad v_i = \frac{1}{2N_1 h_i} (r_i^2 - r_i h_i) \quad (9)$$

с соответствующими граничными условиями

$$v = 0, \quad u = 0 \quad r = h(\theta) \quad (10)$$

$$v = 0, \quad u = 1 \quad r = r_0 = 0 \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi$$

$$v = 0, \quad u = 1 \quad r = 0 - \tilde{h}(\theta) \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$$

$$z(0) = z(\theta_1) = z(\theta_2) = z(2\pi) = e^{-\alpha \frac{p_0}{p}}$$

где  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – соответственно угловые координаты канавки. К граничным условиям (10) также добавим условие постоянства расхода смазочного материала в любом сечении, т. е.  $Q = \text{const}$ , и условие непрерывности гидродинамического давления в окрестности канавки.

Автомодельное решение задачи (8) с учетом (9) и дополнительного граничного условия ищем по известному методу [20], [21]. В результате для поля скоростей и давления получим

$$\begin{aligned}
 \tilde{\Psi}'_1(\xi_1) &= a_1 \frac{\xi_1^2}{2} - a_1 \frac{\xi_2}{2}; & \tilde{u}_1(\xi_1) &= b_1 \frac{\xi_1^2}{2} - \frac{N^2}{2N_1} \left( \frac{\xi_1^3}{3} - \frac{\xi_1^2}{2} \right) - \left( \frac{N^2}{12N_1} + \frac{b_1}{2} + 1 \right) \xi_1 + 1, \\
 p_1 &= \frac{p_g}{p^*} + 6 \left( 1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left( \frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left( \eta \sin \theta + \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega \theta - 1) - \frac{\eta_1 \theta}{2\pi \omega} (\cos 2\pi \omega - 1) \right); \\
 \left( \tilde{\Psi}'_2(\xi_2) &= a_2 \frac{\xi_2^2}{2} - a_2 \frac{\xi_2}{2}, & \tilde{u}_2(\xi_2) &= b_2 \frac{\xi_2^2}{2} - \frac{N^2}{2N_1} \left( \frac{\xi_2^3}{3} - \frac{\xi_2^2}{2} \right) - \left( \frac{N^2}{12N_1} + \frac{b_2}{2} + 1 \right) \xi_2 + 1; \right. \\
 p_2 &= \frac{p_\varepsilon}{p^*} + \frac{6}{(1 + \tilde{h})^2} \left( 1 + \alpha \frac{p_\varepsilon}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left( \frac{p_\varepsilon}{p^*} \right)^2 \right) \left[ (\theta - \theta_1) \left( \frac{\theta_1^2}{4\pi^2} + \left( 1 - \frac{5\theta_1}{2\pi} \right) \left( \frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi \omega} (\cos 2\pi \omega - \cos \omega \theta_1) - \right. \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \left. - \frac{\tilde{\eta}}{2\pi} \sin \theta_1 \right) \right) + \left( 1 - \frac{3\theta_1^2}{4\pi^2} \right) \left( \tilde{\eta} (\sin \theta - \sin \theta_1) + \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega \theta - \cos \omega \theta_1) \right) \right]; \\
 \tilde{\Psi}'_3(\xi_3) &= a_3 \frac{\xi_3^2}{2} - a_3 \frac{\xi_3}{2}, & \tilde{u}_3(\xi_3) &= b_3 \frac{\xi_3^2}{2} - \frac{N^2}{2N_1} \left( \frac{\xi_3^3}{3} - \frac{\xi_3^2}{2} \right) - \left( \frac{N^2}{12N_1} + \frac{b_3}{2} + 1 \right) \xi_3 + 1; \\
 p_3 &= \frac{p_g}{p^*} + 6 \left( 1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left( \frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left[ (\theta - \theta_2) \left( \frac{\theta_2^2}{4\pi^2} + \left( 1 - \frac{5\theta_2}{2\pi} \right) \left( \frac{\eta_1}{2\pi \omega} (\cos 2\pi \omega - \cos \omega \theta_2) - \right. \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \left. - \frac{\eta}{2\pi} \sin \theta_2 \right) \right) + \left( 1 - \frac{3\theta_2^2}{4\pi^2} \right) \left( \eta (\sin \theta - \sin \theta_2) + \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega \theta - \cos \omega \theta_2) \right) \right].
 \end{aligned} \tag{11}$$

Зная выражения гидродинамического давления и скорости, найдем аналитические выражения для несущей способности и силы трения:

$$\begin{aligned}
 R_x &= \frac{6(2\mu_0 + \kappa_0) \Omega_0^3}{2\delta^2} \left( 1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left( \frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left[ \int_0^{\theta_1} p_1 \cos \theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} p_2 \cos \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} p_3 \cos \theta d\theta \right]. \\
 R_y &= \frac{6(2\mu_0 + \kappa_0) \Omega_0^3}{2\delta^2} \left( 1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left( \frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left[ \int_0^{\theta_1} p_1 \sin \theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} p_2 \sin \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} p_3 \sin \theta d\theta \right]. \\
 L_{pp} &= \mu_0 \left( 1 - \alpha p + \frac{\alpha^2 p^2}{2} \right) \left[ \int_0^{\theta_0} \left( \frac{\tilde{\Psi}'_1''(0)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{u}'_1(0)}{h(\theta)} \right) d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left( \frac{\tilde{\Psi}'_2''(0)}{(h(\theta) + \tilde{h})^2} + \frac{\tilde{u}'_2(0)}{(h(\theta) + \tilde{h})^3} \right) d\theta + \right. \\
 &\quad \left. + \int_{\theta_2}^{2\pi} \left( \frac{\tilde{\Psi}'_3''(0)}{h(\theta)^2} + \frac{\tilde{u}'_3(0)}{h(\theta)} \right) d\theta \right].
 \end{aligned} \tag{12}$$

Проверочные расчеты полученной теоретической модели проведены с использованием параметров в следующих диапазонах их численных значений:  $(\theta_1 - \theta_2) = 5,74^0 - 22,92^0$  (ширина канавки),  $r = 20$  мм;  $v = 0,3-3$  м/с;  $\sigma = 14-70$  МПа;  $\mu_0 = 0,0707-0,0076$  Н·с/м<sup>2</sup>. В результате исследований установлено, что несущая способность повышается примерно на 12–14 %, а коэффициент трения снижается на 11–12 % в диапазоне исследованных режимов в гидродинамическом режиме смазывания.

Для подтверждения эффективности теоретических моделей нами проведено экспериментальное исследование для подшипников с полимерным покрытием на поверхности вала с канавкой и без канавки (табл. 1).

Исследуемые антифрикционные покрытия представляют собой гибридный композиционный материал, состоящий из трех типов полимеров различной физической породы. Это тканый каркас из фторопластовых нитей «полифен» (ТУ 6-06-9-7-81) и полиимидных нитей «аримид Т» (ТУ 6-06-9-11-80), пропитанный матричным связующим на основе фенольной смолы, модифицированной термостойким каучуком.

Применяемые микрополярные смазочные материалы получены путем добавления масла МС-20 8-ми процентов порошка меди МП00.

Исследование радиальных подшипников скольжения проводились на модернизированной машине трения модели ИИ5018 на образцах в виде частичных вкладышей. Образцы представляют собой колодку из стали 45 с.

Таблица 1 - Сравнительный анализ результатов исследования поверхности вала с фторопластсодержащим композиционным полимерным покрытием

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.54.2>

№ п/п	Режим		Теоретический результат		Экспериментальное исследование		Погрешность, %	
	$\sigma$ , МПа	V, м/с	Покрытие полимерное	Покрытие и канавка	Покрытие	Покрытие с канавкой		
1	14	0,3	0,0130	0,0112	0,0154	0,0129	5–12	6–13
2	28	0,3	0,0075	0,0058	0,0089	0,0057		
3	42	0,3	0,0055	0,0036	0,0068	0,0048		
4	56	0,3	0,0070	0,0046	0,0092	0,0067		
5	70	0,3	0,0110	0,0079	0,0122	0,0093		

### Основные результаты

По результатам экспериментального исследования получен устойчивый гидродинамический режим трения после 3-минутной приработки с колебаниями коэффициента трения, при этом нагрузка увеличивалась ступенчато в 5 раз до 70 МПа.

Анализ полученных результатов подтверждает эффективность теоретических расчетных моделей и доказывает преимущество исследованных подшипников скольжения, обеспечивающих повышение несущей способности и снижение коэффициента трения.

### Заключение

1. В результате исследований получены новые математические модели для инженерных расчетов, позволяющих определить величину основных триботехнических параметров (сила трения, нагрузочная способность, гидродинамическое давление).

2. Расчетные модели учитывают применение дополнительного смазывания полимерным покрытием и канавку на поверхности вала.

3. Применение исследованных радиальных подшипников скольжения значительно повышает несущую способность (12–14 %), а коэффициент трения снижается на 11–12 %.

4. Таким образом, конструкция радикального подшипника с фторопластсодержащим антифрикционным композиционным полимерным покрытием и канавкой шириной 3 мм обеспечила стабильное всплытие вала на гидродинамическом клине, что экспериментально подтвердило правильность результатов теоретических исследований.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.54.3>

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

International Research Journal Reviewers Community  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.54.3>

### Список литературы / References

1. Хасьянова Д.У. Повышение износостойкости радиального подшипника скольжения, смазываемого микрополярными смазочными материалами и расплавами металлического покрытия / Д.У. Хасьянова, М.А. Мукутадзе // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2022. — 4. — с. 46–53. – DOI: 10.31857/S0235711922040101.

2. Polyakov R. The method of long-life calculation for a friction couple "rotor — hybrid bearing" / R. Polyakov, L. Savin // Proceedings of the 7th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering, COUPLED PROBLEMS 2017, Rhodes Island. — 2017. — p. 433-440.

3. Поляков Р.Н. Математическая модель бесконтактного пальчикового уплотнения с активным управлениемзором / Р.Н. Поляков, Л.А. Савин, А.В. Внуков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2018. — 1(327). — с. 66-71.

4. Негматов С.С. Исследование вязкоупругих и адгезионно-прочностных свойств и разработка эффективных вибропоглощающих композиционных полимерных материалов и покрытий машиностроительного назначения / С.С. Негматов и др. // Пластические массы. — 2020. — 7-8. — с. 32-36.

5. Polyakov R. Predictive analysis of rotor machines fluid-film bearings operability / R. Polyakov et al. // Vibroengineering procedia. — 2020. — Vol. 30. — p. 61-67. — DOI: 10.21595/vp.2020.21379.

6. Kornaeva E.P. Application of artificial neural networks to diagnostics of fluid-film bearing lubrication / E.P. Kornaeva et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 734. — 012154. — DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012154.
7. Shutin D.V. Active hybrid bearings as mean for improving stability and diagnostics of heavy rotors of power generating machinery / D.V. Shutin, R.N. Polyakov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 862. — 032098. — DOI: 10.1088/1757-899X/862/3/032098.
8. Zinoviev V.E. Analysis of factors affecting the strength of fixed bonds assembled using metal-polymer compositions / V.E. Zinoviev et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 900 (1). — 2020. — 012009. — DOI: 10.1088/1757-899X/900/1/012009.
9. Харламов П.В. Мониторинг изменений упруго-диссипативных характеристик для решения задач по исследованию трибологических процессов в системе «железнодорожный путь — подвижной состав» / П.В. Харламов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2021. — 1. — с. 122-129.
10. Харламов П.В. Применение физико-химического подхода для изучения механизма образования вторичных структур фрикционного переноса на поверхности контртела / П.В. Харламов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2021. — 3. — с. 37-45.
11. Харламов П.В. Исследование образования вторичных структур фрикционного переноса на поверхности стальных образцов при реализации технологии металлоплакирования / П.В. Харламов // Сборка в машиностроении, приборостроении. — 2021. — 12. — с. 556-560.
12. Шаповалов В.В. Повышение эффективности фрикционной системы «колесо — рельс» / В.В. Шаповалов и др. // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 2019. — Т. 78. — 3. — С. 177-182.
13. Shapovalov V.V. Improving the efficiency of the path — rolling stock system based on the implementation of anisotropic frictional bonds / V.V. Shapovalov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 900(1). — 012011. — DOI: 10.1088/1757-899X/900/1/012011.
14. Шаповалов В.В. Металлоплакирование рабочих поверхностей трения пары «колесо — рельс» / В.В. Шаповалов и др. // Трение и износ. — 2020. — Т. 41. — 4. — С. 464-474. — DOI: 10.3103/S1068366620040121.
15. Kolesnikov I.V. Ways of Increasing Wear Resistance and Damping Properties of Radial Bearings with Forced Lubricant supply / I.V. Kolesnikov, A.M. Mukutadze, V.V. Avilov // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering (ICIE 2018). — 2018. — p. 1049-1062.
16. Ахвердиев К.С. Демпфер с пористым элементом для подшипниковых опор / К.С. Ахвердиев и др. // Трение и износ. — 2016. — Т. 37. — 4. — С. 502-509.
17. Ахвердиев К.С. Расчетная модель составного цилиндрического подшипника, работающего в устойчивом режиме, при неполном заполнении смазочным материалом зазора / К.С. Ахвердиев и др. // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2016. — 3. — с. 64-69.
18. Лагунова Е.О. Радиальные подшипники скольжения, обусловленные расплавом / Е.О. Лагунова, М.А. Мукутадзе // Труды IV Международной научно-технической конференции «ПРОМ-ИНЖИНИРИНГ», Москва-Челябинск-Новочеркасск, 15—18 мая 2018 г. — Челябинск: Южно-Уральский государственный университет, 2018. — с. 56-62.
19. Ахвердиев К.С. Гидродинамический расчет радиального подшипника, смазываемого расплавом легкоплавкого покрытия при наличии смазочного материала / К.С. Ахвердиев и др. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2017. — 2(66). — С. 129-135.
20. Khasyanova D.U. Mathematical model for a lubricant in a sliding bearing with a fusible coating in terms of viscosity depending on pressure under an incomplete filling of a working gap / D.U. Khasyanova et al. // Journal of machinery manufacture and reliability. — 2021. — Vol. 50. — 5. — p. 405-411. — DOI: 10.3103/S1052618821050083.
21. Mukutadze M.A. Mathematical model of a lubricant in a bearing with a fusible coating on the pilot and irregular slider profile / M.A. Mukutadze, E.O. Lagunova // Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). — 2022. — p. 834-840.

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

1. Khasyanova D.U. Povyshenie iznosostojkosti radial'nogo podshipnika skol'zheniya, smazyvaемого mikropolyarnymi smazochnymi materialami i rasplavami metallichesкого pokrytiya [Increasing the wear resistance of a radial sliding bearing lubricated with micropolar lubricants and metal coating melts] / D.U. Khasyanova, M.A. Mukutadze // Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin [Problems of mechanical engineering and machine reliability]. — 2022. — 4. — p. 46-53. — DOI: 10.31857/S0235711922040101. [in Russian]
2. Polyakov R. The method of long-life calculation for a friction couple "rotor — hybrid bearing" / R. Polyakov, L. Savin // Proceedings of the 7th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering, COUPLED PROBLEMS 2017, Rhodes Island. — 2017. — p. 433-440.
3. Polyakov R.N. Matematicheskaya model' beskontaktnogo pal'chikovogo uplotneniya s aktivnym upravleniem zazorom [Mathematical model of contactless finger seal with active gap control] / R.N. Polyakov, L.A. Savin, A.V. Vnukov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology]. — 2018. — 1(327). — p. 66-71. [in Russian]
4. Negmatov S.S. Issledovanie vyzkouprugih i adgezionno-prochnostnyh svojstv i razrabotka effektivnyh vibropogloshchayushchih kompozicionnyh polimernyh materialov i pokrytij mashinostroitel'nogo naznacheniya [Research of viscoelastic and adhesive-strength properties and development of effective vibration-absorbing composite polymer materials]

and coatings for machine-building purposes] / S.S. Negmatov et al. // *Plasticheskie massy [Plastic masses]*. — 2020. — 7-8. — p. 32-36. [in Russian]

5. Polyakov R. Predictive analysis of rotor machines fluid-film bearings operability / R. Polyakov et al. // *Vibroengineering procedia*. — 2020. — Vol. 30. — p. 61-67. — DOI: 10.21595/vp.2020.21379.

6. Kornaeva E.P. Application of artificial neural networks to diagnostics of fluid-film bearing lubrication / E.P. Kornaeva et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2020. — Vol. 734. — 012154. — DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012154.

7. Shutin D.V. Active hybrid bearings as mean for improving stability and diagnostics of heavy rotors of power generating machinery / D.V. Shutin, R.N. Polyakov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2020. — Vol. 862. — 032098. — DOI: 10/1088/1757-899X/862/3/032098.

8. Zinoviev V.E. Analysis of factors affecting the strength of fixed bonds assembled using metal-polymer compositions / V.E. Zinoviev et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 900 (1). — 2020. — 012009. — DOI: 10.1088/1757-899X/900/1/012009.

9. Kharlamov P.V. Monitoring izmenenij uprugo-dissipativnyh karakteristik dlya resheniya zadach po issledovaniyu tribologicheskikh processov v sisteme "zheleznodorozhnyj put' — podvizhnoj sostav" [Monitoring of changes in elastic-dissipative characteristics for solving problems in the study of tribological processes in the system "railway track — rolling stock"] / P.V. Kharlamov // *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya [Bulletin of the Rostov State University of Railway Transport]*. — 2021. — 1. — p. 122-129. [in Russian]

10. Kharlamov P.V. Primenenie fiziko-himicheskogo podhoda dlya izucheniya mekhanizma obrazovaniya vtorichnyh struktur frikcionnogo perenosha na poverhnosti kontrtela [Application of a physico-chemical approach to study the mechanism of formation of secondary structures of frictional transfer on the surface of a counterbody] / P.V. Kharlamov // *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya [Bulletin of the Rostov State University of Railway Transport]*. — 2021. — 3. — p. 37-45. [in Russian]

11. Kharlamov P.V. Issledovanie obrazovaniya vtorichnyh struktur frikcionnogo perenosha na poverhnosti stal'nyh obrazcov pri realizacii tekhnologii metalloplakirovaniya [Investigation of the formation of secondary structures of frictional transfer on the surface of steel samples during the implementation of metal plating technology] / P.V. Kharlamov // *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii [Assembling in mechanical engineering, instrumentation]*. — 2021. — 12. — p. 556-560. [in Russian]

12. Shapovalov V.V. Povyshenie effektivnosti frikcionnoj sistemy "koleso — rel's" [Improving the efficiency of the friction system "wheel — rail"] / V.V. Shapovalov et al. // *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [Russian railway science journal]*. — 2019. — Vol. 78. — 3. — P. 177-182. [in Russian]

13. Shapovalov V.V. Improving the efficiency of the path — rolling stock system based on the implementation of anisotropic frictional bonds / V.V. Shapovalov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2020. — Vol. 900(1). — 012011. — DOI: 10.1088/1757-899X/900/1/012011.

14. Shapovalov V.V. Metalloplakirovanie rabochih poverhnostej treniya pary "koleso — rel's" [Metal plating working surfaces of friction pairs "wheel — rail"] / V.V. Shapovalov et al. // *Trenie i iznos [Friction and wear]*. — 2020. — Vol. 41. — 4. — P. 464-474. — DOI: 10.3103/S1068366620040121. [in Russian]

15. Kolesnikov I.V. Ways of Increasing Wear Resistance and Damping Properties of Radial Bearings with Forced Lubricant supply / I.V. Kolesnikov, A.M. Mukutadze, V.V. Avilov // *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering (ICIE 2018)*. — 2018. — p. 1049-1062.

16. Akhverdiev K.S. Dempfer s poristym elementom dlya podshipnikovyh opor [A damper with a porous element for bearing supports] / K.S. Akhverdiev et al. // *Trenie i iznos [Friction and wear]*. — 2016. — Vol. 37. — 4. — P. 502-509. [in Russian]

17. Akhverdiev K.S. Raschetnaya model' sostavnogo cilindricheskogo podshipnika, rabotayushchego v ustojchivom rezhime, pri nepolnom zapolnenii smazochnym materialom zazora [Calculation model of a composite cylindrical bearing operating in a stable mode with incomplete filling of the gap with lubricant] / K.S. Akhverdiev et al. // *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin [Problems of mechanical engineering and machine reliability]*. — 2016. — 3. — p. 64-69. [in Russian]

18. Lagunova E.O. Radial'nye podshipniki skol'zheniya, obuslovlennye rasplavom [Radial bearings due to melt] / E.O. Lagunova, M.A. Mukutadze // *Trudy IV Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «PROM-INZhINIRING», Moskva-Cheljabinsk-Novocherkassk, 15—18 maja 2018 g. [Proceedings of the IV International Scientific and Technical Conference "PROM-ENGINEERING", Moscow-Chelyabinsk-Novocherkassk, May 15-18, 2018]*. — Chelyabinsk: South Ural State University (National Research University). — 2018. — p. 56-62. [in Russian]

19. Akhverdiev K.S. Gidrodinamicheskij raschet radial'nogo podshipnika, smazyvaemogo rasplavom legkoplavkogo pokrytiya pri nalichii smazochnogo materiala [Hydrodynamic calculation of a radial bearing lubricated by a melt of a low-melting coating in the presence of a lubricant] / K.S. Akhverdiev et al. // *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshheniya [Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya]*. — 2017. — 2 (66). — P. 129-135. [in Russian]

20. Khasyanova D.U. Mathematical model for a lubricant in a sliding bearing with a fusible coating in terms of viscosity depending on pressure under an incomplete filling of a working gap / D.U. Khasyanova et al. // *Journal of machinery manufacture and reliability*. — 2021. — Vol. 50. — 5. — p. 405-411. — DOI: 10.3103/S1052618821050083.

21. Mukutadze M.A. Mathematical model of a lubricant in a bearing with a fusible coating on the pilot and irregular slider profile / M.A. Mukutadze, E.O. Lagunova // *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021)*. — 2022. — p. 834-840.