

Повышение износостойкости радиального подшипника с нестандартным опорным профилем и полимерным покрытием на поверхности вала с учетом зависимости вязкости от давления

© 2022

*Абдулрахман Хайдар Нофалевич*¹, кандидат физико-математических наук, доцент
*Киришицева Виктория Игоревна*², аспирант кафедры «Высшая математика»
Мукутадзе Мурман Александрович^{*3}, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Высшая математика»

*Шведова Валентина Евгеньевна*⁴, аспирант кафедры «Высшая математика»

Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону (Россия)

*E-mail: murman1963@yandex.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1588-9311>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7275-2576>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2810-3047>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8469-7671>

Поступила в редакцию 10.08.2022

Принята к публикации 18.10.2022

Аннотация: Статья посвящена разработке и анализу модели движения истинно вязкого смазочного материала в рабочем зазоре радиального подшипника скольжения с нестандартным опорным профилем, имеющим на поверхности вала фторопластсодержащее композиционное полимерное покрытие с канавкой. Новые модели получены на базе классических уравнений в приближении для «тонкого слоя» и уравнения неразрывности, описывающих ламинарный режим движения смазочного материала с вязкими реологическими свойствами. Результаты проведенного численного анализа полученных моделей позволили получить количественную оценку эффективности опорного профиля подшипниковой втулки и вала с полимерным покрытием с осевой канавкой. Для завершения комплекса исследований и верификации теоретических разработок были выполнены экспериментальные исследования. Новизна работы заключается в конкретизации методики инженерных расчетов, позволяющей оценить величину основных триботехнических параметров радиального подшипника скольжения (гидродинамического давления, нагрузочной способности и коэффициента трения), а также расширить область практического применения разработанных инженерных расчетов. Конструкция радиального подшипника с полимерным покрытием, канавкой шириной 3 мм и специальным опорным профилем обеспечила стабильное всплытие вала на гидродинамическом клине, что экспериментально подтвердило правильность результатов теоретических исследований подшипников скольжения диаметром 40 мм при скорости скольжения 0,3–3 м/с и нагрузке 13–65 МПа.

Ключевые слова: радиальный подшипник; повышение износостойкости; антифрикционное полимерное композиционное покрытие; канавка; гидродинамический режим; верификация; зависимость вязкости от давления.

Для цитирования: Абдулрахман Х.Н., Киришицева В.И., Мукутадзе М.А., Шведова В.Е. Повышение износостойкости радиального подшипника с нестандартным опорным профилем и полимерным покрытием на поверхности вала с учетом зависимости вязкости от давления // Frontier Materials & Technologies. 2022. № 4. С. 9–17. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-4-9-17.

ВВЕДЕНИЕ

В современной технике очень остро стоит проблема повышения надежности опор скольжения, вносящих наибольший вклад в безотказность и долговечность машин в самых разных областях промышленного производства. Одним из эффективных путей повышения ресурса машин и механизмов является совершенствование конструкций, технологий изготовления узлов, применение высококачественных смазочных материалов.

Полимерные композиционные фторопластсодержащие материалы в виде антифрикционных покрытий в настоящее время широко применяются в тяжело нагруженных низкоскоростных трибосистемах самых разных машин, значительно повышая ресурс узлов трения.

Несмотря на уникальные антифрикционные свойства фторопласта и его способность работать в узлах трения в режиме самосмазываемости, существенным ре-

зервом повышения его износостойкости является дополнительное применение смазочных материалов, что позволит расширить их скоростной диапазон, поскольку обеспечит переход от граничного трения самосмазыванием к жидкостному трению в условиях гидродинамики. Тогда во время пусков и выбегов будут работать покрытия, а в стационарный период – смазка.

К сожалению, в современной технической литературе практически полностью отсутствуют прямые экспериментальные данные о процессах трения и изнашивания полимерных композиционных покрытий в среде жидких смазочных материалов. Имеется лишь небольшое количество работ по экспериментальным исследованиям [1–3], доказывающее эффективность применения антифрикционных полимерных покрытий.

Основы качества узлов трения закладываются в первую очередь при их расчетах и проектировании. Современные методы расчета и моделирования узлов трения

машин активно развиваются и совершенствуются. Однако постоянное увеличение количества значимых параметров, влияющих на работу трибосопряжений, изменение условий их работы в направлении увеличения скоростей вращения и рабочей температуры, а также использование различных конструкционных материалов для получения защитного покрытия на металлических поверхностях [4–6] вынуждают исследователей разрабатывать новые методики и математические модели для адекватного моделирования условий работы узлов трения машин.

Из основных результатов работы [7] следует, что резиновый порошок, вводимый в эпоксидные полимеры в качестве наполнителя, оказывает пластифицирующее действие, в результате чего снижается температура стеклования композиции и улучшаются их вибропоглощающие свойства. Установлено, что с учетом варьирования вида, содержания и соотношения органоминеральных ингредиентов и эпоксидных компаундов можно разработать эффективные вибропоглощающие полимерные композиционные материалы для применения в рабочих органах машин и механизмов, способствующие повышению их работоспособности, эффективности и снижению уровня шума. В работе [8] описано решение задачи идентификации природы повреждений в стеклопластике по спектрам Фурье, рассчитанным для зарегистрированных сигналов акустической эмиссии (АЭ) при статической деформации изгибом образца стеклопластика до разрушения. Для оценки кинетики образования и развития повреждений использовался метод кластеризации. В результате исследования установлено следующее: диапазон частот регистрируемых сигналов АЭ 160–240 кГц для межслоевых повреждений матриц; изменение масштаба повреждений матрицы и его дальнейшее развитие до разрушения матрицы в диапазоне пиковых частот с 24–38 до 50–78 кГц [8].

Результаты исследования [9], посвященного гидрочромному координационному полимеру, синтезируемому с использованием π -электронодефицитного L_1 в качестве основного лиганда в сольвотермических условиях, показывают, что полученная в результате архитектура обеспечивает его высокую гибкость и стабильность, тем самым контролируя образование или тушение радикалов.

В работе [10] показано, что использование мягкого шаблона с модификацией полидопамина при нанесении дисперсионного покрытия улучшило теплопроводность полимерного композита в сквозной плоскости на 1118 % по сравнению с чистой полимерной матрицей, при этом модуль Юнга образца увеличился в 4 раза.

Для уменьшения испарения при измерениях экстенсивной реологии при капании на подложку полимерных растворов в работе [11] разработана камера для выпаривания образца в среде, насыщенную парами растворителя. Выпаривание существенно увеличивало время релаксации, растяжения полиэтиленоксида (ПЭО) в летучих растворителях, таких как дихлорметан и хлороформ. Растворы ПЭО хлороформа показали более чем 20-кратное увеличение времени релаксации и растяжения. В результате измерения доказано, что хлороформ является хорошим растворителем для ПЭО с показателем Флори $\nu=0,54$.

Успешное развитие промышленности невозможно без использования надежной и высокопроизводительной техники. Необходимо создание машин и механизмов, обладающих высокой износостойкостью и другими эксплуатационными параметрами. С целью расширения области применения покрытий, представляющих собой гибридный композит с армирующим каркасом из специальной ткани, для нанесения на поверхности втулки тормозной передачи была изготовлена партия образцов, представляющих собой шестую часть втулки из стали 45 с нанесенным покрытием изучаемой структуры. Затем проводились сравнительные трибологические испытания на стенде по схеме «вал – частичный вкладыш». По результатам экспериментальных исследований [12; 13] была подтверждена целесообразность использования в шарнирных соединениях антифрикционного полимерного композиционного покрытия с матрицей холодного отверждения. Детали трибоузлов, работающих в условиях повышенного трения, все чаще изготавливаются из различных композиционных и металлических материалов. Например, в работах [14–16] приведено экспериментальное исследование идентификации источников акустической эмиссии полимерных композитов с матрицей на основе фенилона С-2. Кроме того, в работах [17; 18] проведено исследование поведения плазменных полимеров при старении и их самовосстановления, позволяющее управлять показателями надежности и долговечности изделий при различных условиях эксплуатации (нагрузки, рабочей температуры, скорости и т. п.). Однако для расширения и конкретизации указанных исследований применительно к трибосопряжениям технологических машин, работающих в условиях 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.

Это обстоятельство подчеркивает важность разработки новых и повышения точности уже имеющихся расчетных моделей подшипников – одного из самых распространенных типов трибосопряжений.

Особенностью полученных авторами расчетных моделей подшипников скольжения является обобщение в едином блоке целого комплекса дополнительных факторов, рассматриваемых ранее только индивидуально.

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

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Постановка задачи

Рассматривается установившееся движение смазочного материала между цапфой, имеющей полимерное покрытие с канавкой, и адаптированным к нагрузкам опорным профилем радиального подшипника. Скорость вращения вала принята равной Ω , а нестандартной втулки – 0 (рис. 1).

В системе координат r' , θ -полюс которой расположен в центре вала, уравнения контура вала с покрытием C_1 ,

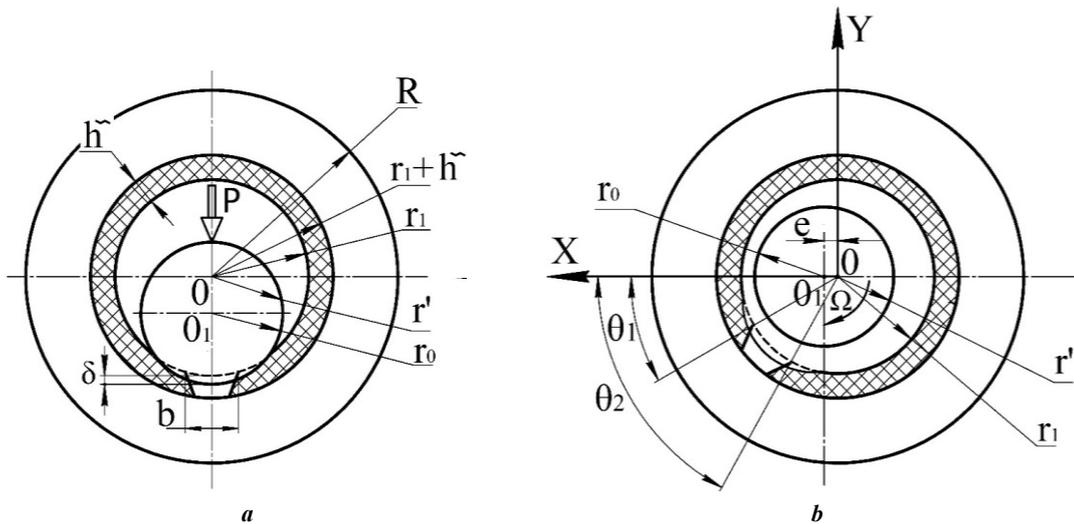


Рис. 1. Расчетная схема трибоконтакта:

a – в покое; **b** – при движении

Fig. 1. Tribo-contact design diagram:

a – at rest; **b** – in motion

вала с канавкой C_0 , нестандартной подшипниковой втулки C_2 и втулки C_3 задаются в виде:

$$C_1 : r' = r_0 ; C_0 : r' = r_0 - \tilde{h} ;$$

$$C_2 : r' = r_1(1 + H) - a' \sin \omega \theta ; C_3 : r' = r_1(1 + H), \quad (1)$$

где r_0 – радиус вала с полимерным покрытием;

\tilde{h} – высота канавки;

r_1 – радиус подшипниковой втулки;

$$H = \varepsilon \cos \theta - \frac{1}{2} \varepsilon^2 \sin^2 \theta + \dots ; \varepsilon = \frac{e}{r_0},$$

где ε – относительный эксцентриситет;

θ – угловая координата;

e – эксцентриситет.

Зависимость реологических свойств смазочного материала от давления задана в виде:

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

где μ' – коэффициент динамической вязкости смазочного материала;

μ_0 – характерная вязкость;

α' – постоянная величина;

p' – гидродинамическое давление в смазочном слое.

Исходные уравнения и граничные условия

Основными уравнениями для решения данной задачи являются уравнение движения несжимаемой жидкости для «тонкого слоя» с учетом (2) и уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial p'_i}{\partial r'} = 0 ; \mu' \frac{\partial^2 v_{\theta_i}}{\partial r'^2} = \frac{dp'_i}{d\theta} ; \frac{\partial v_{r'_i}}{\partial r'} + \frac{v_{r'_i}}{r'} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v_{\theta_i}}{\partial \theta} = 0, \quad (3)$$

где v_{θ_i} , $v_{r'_i}$ – компоненты вектора скорости смазочной среды.

Система уравнений (3) имеет следующие граничные условия:

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

$$v_{r'} = 0, v_{\theta} = \Omega r_0 \text{ при } r' = r_0 ;$$

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

$$p'(0) = p'(\theta) = p_g, r_0 - \tilde{h} = h_0^* \text{ при } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2. \quad (4)$$

Переход к безразмерным величинам осуществлен при помощи следующих формул:

$$v_{\theta} = \Omega v(r_0 - \tilde{h}) ; v_{r'} = \Omega \delta u ; p' = p^* p ;$$

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

$$\mu' = \mu_0 \mu ; \alpha' = \frac{\alpha}{p^*} ; r' = (r_0 - \tilde{h}) + \delta r ; \delta = r_1 - (r_0 - \tilde{h}) ;$$

$$v_{\theta} = \Omega v r_0 ; p^* = \frac{\mu_0 \Omega r_0^2}{\delta^2} ; r' = r_0 + \delta r, \delta = r_1 - r_0. \quad (5)$$

С учетом (5) уравнения (3)–(4) преобразуются к виду:

$$\frac{\partial p_i}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} = e^{-\alpha r} \frac{dp_i}{d\theta}; \quad \frac{\partial u_i}{\partial r} + \frac{\partial v_i}{\partial \theta} = 0;$$

$$u = 0, \quad v = 1 \quad \text{при } r = r_0 - \tilde{h}; \quad (6)$$

$$u = 0, \quad v = 1 \quad \text{при } r = r_0;$$

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

$$p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{P_g}{P}, \quad (7)$$

где $\eta = \frac{e}{\delta}$;

$$\eta_1 = \frac{a'}{\delta}.$$

Введем обозначение $z = e^{-\alpha r}$ и, сделав ряд преобразований, получим

$$\frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} = -\frac{1}{\alpha} \frac{\partial z_i}{\partial \theta}, \quad \frac{\partial u_i}{\partial r} + \frac{\partial v_i}{\partial \theta} = 0 \quad (8)$$

с соответствующими граничными условиями:

$$v = 0, \quad u = 0 \quad \text{при } r = h(\theta);$$

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

$$v = 1, \quad u = 0 \quad \text{при } r = r_0, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi;$$

$$z(0) = z(\theta_1) = z(\theta_2) = z(2\pi) = e^{-\alpha \frac{r_g}{P}}, \quad (9)$$

где θ_1 и θ_2 – угловые координаты канавки на поверхности вала.

К граничным условиям (9) следует добавить условие постоянства расхода смазочного материала в любом сечении, т. е. $Q = \text{const}$, и условие непрерывности гидродинамического давления в окрестности канавки.

Нахождение гидродинамического давления и поля скоростей

Автомодельное решение задачи (8) с учетом (9) и дополнительного граничного условия ищется по известному методу [19; 20]. В результате для поля скоростей и давления получено:

$$\tilde{\Psi}'_1(\xi_1) = a_1 \frac{\xi_1}{2} (\xi_1 - 1);$$

$$\tilde{v}_1(\xi_1) = b_1 \frac{\xi_1^2}{2} - \left(1 + \frac{b_1}{2}\right) \xi_1 + 1;$$

$$\tilde{\Psi}'_2(\xi_2) = a_2 \frac{\xi_2}{2} (\xi_2 - 1);$$

$$\tilde{v}_2(\xi_2) = b_2 \frac{\xi_2^2}{2} - \left(1 + \frac{b_2}{2}\right) \xi_2 + 1;$$

$$\tilde{\Psi}'_3(\xi_3) = a_3 \frac{\xi_3}{2} (\xi_3 - 1);$$

$$\tilde{v}_3(\xi_3) = b_2 \frac{\xi_3^2}{2} - \left(1 + \frac{b_3}{2}\right) \xi_3 + 1;$$

$$p_1 = \frac{P_g}{P^*} + 6 \left(1 + \alpha \frac{P_g}{P^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{P_g}{P^*}\right)^2\right) \times \left(\eta \sin \theta + \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega \theta - 1) - \frac{\eta_1 \theta}{2\pi} (\cos 2\pi \omega - 1)\right);$$

$$p_2 = \frac{P_g}{P^*} + \frac{6}{(1 + \tilde{h})^2} \left(1 + \alpha \frac{P_g}{P^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{P_g}{P^*}\right)^2\right) \times \left[(\theta - \theta_1) \left(\frac{\theta_1^2}{4\pi^2} + \left(1 - \frac{5\theta_1}{2\pi}\right) \times \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_1) - \frac{\tilde{\eta}}{2\pi} \sin \theta_1 \right) \right) + \left(1 - \frac{3\theta_1^2}{4\pi^2}\right) \left(\tilde{\eta} (\sin \theta - \sin \theta_1) + \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega\theta - \cos \omega\theta_1) \right) \right]; \quad (10)$$

Для определения несущей способности и силы трения использована формула (10):

$$R_x = \frac{6\mu_0 r_0^3 \Omega}{2\delta^2} \left[\int_0^{\theta_1} \left(p_1 - \frac{P_g}{P^*}\right) \cos \theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(p_2 - \frac{P_g}{P^*}\right) \cos \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} \left(p_3 - \frac{P_g}{P^*}\right) \cos \theta d\theta \right];$$

$$R_y = \frac{6\mu_0 \omega r_0^3}{2\delta^2} \left[\int_0^{\theta_1} \left(p_1 - \frac{P_g}{P^*}\right) \sin \theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(p_2 - \frac{P_g}{P^*}\right) \sin \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} \left(p_3 - \frac{P_g}{P^*}\right) \sin \theta d\theta \right];$$

$$L_{\text{тр}} = \mu \left[\int_0^{\theta_1} \left(\frac{\tilde{\Psi}_1''(\theta)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{v}_1'(\theta)}{h(\theta)} \right) d\theta + \right.$$

$$\left. + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(\frac{\tilde{\Psi}_2''(\theta)}{(h(\theta) + \tilde{h})^2} + \frac{\tilde{v}_2'(\theta)}{(h(\theta) + \tilde{h})} \right) d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} \left(\frac{\tilde{\Psi}_3''(\theta)}{h(\theta)} + \frac{\tilde{v}_3'(\theta)}{h(\theta)} \right) d\theta \right]; \quad (11)$$

Проверочные расчеты полученной теоретической модели проведены с использованием параметров в следующих диапазонах их численных значений: $(\theta_2 - \theta_1) = 5,74 - 22,92$; $r = 20$ мм; $V = 0,3 - 3$ м/с; $\sigma = 13 - 65$ МПа; $\mu_0 = 0,0067 - 0,024987$ Н·с/м².

Проведение эксперимента

Экспериментальное исследование состоит из: 1) верификации разработанной расчетной модели радиального подшипника скольжения с оптимальным сечением маслоподдерживающей канавки и определения величины погрешности; 2) комплекса экспериментальных исследований подшипника с новой разработанной конструкцией опорной поверхности подшипниковой втулки, которая представляет собой несущую поверхность с антифрикционным полимерным композиционным покрытием, имеющим маслоподдерживающую канавку, а также профилем, контур которого адаптирован к конкретным условиям трения.

В процессе исследований установлена область рационального применения полученных моделей подшипников. Исследуемые антифрикционные покрытия представляют собой гибридный композиционный материал, состоящий из трех типов полимеров различной физической природы. 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.

Триботехнические экспериментальные исследования радиальных подшипников скольжения проводились на модернизированной машине трения ИИ 5018 на образцах в виде частичных вкладышей. Колодки вырезались из кольцевой заготовки по центральному углу, равному 60°. На их рабочие поверхности наносились полимерные композиционные покрытия и канавки вдоль оси трибосопряжения на глубину покрытия. Кроме того, колодки имели отверстия для термомпар.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате теоретического исследования установлено, что несущая способность радиального подшипника скольжения с антифрикционным полимерным покрытием поверхности вала, содержащим канавку, а также адаптированным к условиям трения профилем опорной поверхности, повышается примерно на 11–12 %, а коэффициент трения снижается на 9–10 % в диапазоне исследованных режимов (таблица 1).

По результатам экспериментального исследования получен устойчивый гидродинамический режим трения после 2-минутной приработки с колебаниями коэффициента трения, при этом нагрузка увеличивалась ступенчато в 5 раз до 65 МПа (таблица 2).

Результаты исследования подтверждают эффективность разработанных теоретических моделей и доказывают преимущество исследованных подшипников скольжения перед существующими за счет повышения нагрузочной способности и снижения коэффициента трения.

Конструкция радиального подшипника с нестандартным опорным профилем, имеющим на поверхности вала фторопластсодержащее антифрикционное композиционное покрытие с канавкой шириной 3 мм, обеспечила стабильное всплытие вала на гидродинамическом клине, что экспериментально подтвердило правильность результатов теоретических исследований подшипников скольжения диаметром 40 мм при скорости скольжения 0,3–3 м/с и нагрузке 13–65 МПа.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Теоретическим исследованием определено необходимое сечение маслоподдерживающих канавок и их количество для выхода радиального подшипника скольжения с полимерным покрытием в режим гидродинамического смазывания при заданной нагрузке.

Затем, после установления параметров канавок, разработана расчетная модель, описывающая работу

Таблица 1. Результаты теоретического исследования поверхности вала с фторопластсодержащим композиционным полимерным покрытием
Table 1. The results of theoretical research of the shaft surface with the fluoroplastic composite polymer coating

№	σ , МПа	Угловые координаты $(\theta_2 - \theta_1)$, °				
		5,74	10,03	14,32	18,61	22,92
		Коэффициент трения				
1	13	0,006890	0,0092130	0,007200	0,0040000	0,00133000
2	26	0,003590	0,0035910	0,003753	0,0020850	0,00069350
3	39	0,000293	0,0003920	0,000306	0,0001705	0,00005700
4	52	0,000195	0,0002613	0,000204	0,0001136	0,00003793
5	65	0,000097	0,0001307	0,000102	0,0000570	0,00001887

Таблица 2. Результаты исследования поверхности вала с фторопластсодержащим композиционным полимерным покрытием
Table 2. The results of the study of the shaft surface with the fluoroplastic composite polymer coating

№	Режим		Коэффициент трения				Погрешность, %	
			Теоретический результат		Экспериментальное исследование			
	σ , МПа	V , м/с	Покрытие полимерное	Покрытие с канавкой	Покрытие полимерное	Покрытие с канавкой		
1	13	0,3	0,0135	0,0117	0,0159	0,0134	5–12	6–13
2	26	0,3	0,0080	0,0063	0,0094	0,0062		
3	39	0,3	0,0060	0,0041	0,0073	0,0053		
4	52	0,3	0,0075	0,0051	0,0097	0,0072		
5	65	0,3	0,0115	0,0084	0,0127	0,0098		

подшипника в гидродинамическом режиме для истинно вязкого смазочного материала. При разработке расчетной модели учтена зависимость вязкости смазочного материала от давления и адаптированный к условиям трения опорный профиль. Полученные расчетные модели позволяют установить при проектировании подшипника с антифрикционным покрытием величины основных эксплуатационных характеристик.

В исследуемой конструкции при вращении вала в канавке возникает циркуляционное движение смазочного материала. Возникающая при этом сила приподнимает вал, и в появившемся зазоре образуется гидродинамический клин.

Использованный при исследованиях комплекс экспериментального оборудования позволил получить достаточно точную необходимую информацию о поведении подшипников скольжения, работающих в условиях гидродинамического смазывания в установленном диапазоне нагрузочно-скоростных режимов.

В соответствии с поставленной целью обоснована общая методика экспериментальных исследований как по классическим однофакторным, так и по полнофакторным планам.

Разработана теоретически и подтверждена экспериментально новая методология формирования расчетных моделей радиальных подшипников, значительно расширяющая область применения моделей и уточняющая получение результатов, которые могут быть использованы в машиностроении, авиастроении, приборостроении и т. д.: там, где необходимо обеспечение гидродинамического режима смазывания.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В результате исследования достигнуто существенное расширение возможностей применения на практике расчетных таких моделей радиального подшипника скольжения с полимерным покрытием с канавкой, работающего в гидродинамическом режиме смазыва-

ния, которые позволяют провести оценку эксплуатационных характеристик: величины гидродинамического давления, нагрузочной способности и коэффициента трения.

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

3. Применение исследованных радиальных подшипников скольжения с канавкой шириной 3 мм значительно повышает их несущую способность (на 11–12 %) и снижает коэффициент трения на 9–10 %.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кохановский В.А., Камерова Э.А. Фторопластсодержащие композиционные покрытия в смазочных средах // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 1. С. 34–37. EDN: [RVQGBD](#).
2. Кохановский В.А., Камерова Э.А. Трение полимерных покрытий в жидких смазочных средах // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 4. С. 17–20. EDN: [SBJMAT](#).
3. Камерова Э.А., Власенко И.Б., Снежина Н.Г., Оганесян П.А. Методика исследования влияния жидких сред на фторопластсодержащие антифрикционные покрытия // Уральский научный вестник. 2014. № 21. С. 137–142.
4. Павлычева Е.А. Разработка полимерной композиции для получения защитного покрытия на металлических поверхностях // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2022. № 2. С. 33–36. DOI: [10.17513/mjpf.13355](#).

5. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Петрова Г.Н., Мекалина И.В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 405–419. DOI: [10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419](https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419).
6. Кузнецов А.А., Семенова Г.К., Свидченко Е.А. Конструкционные термопласты как основа для самосмазывающихся полимерных композиционных материалов антифрикционного назначения // *Вопросы материаловедения*. 2009. № 1. С. 116–126. EDN: [KUAIKL](https://www.edn.net/KUAIKL).
7. Негматов С.С., Абед Н.С., Саидахмедов Р.Х. и др. Исследование вязкоупругих и адгезионно-прочностных свойств и разработка эффективных вибропоглощающих композиционных полимерных материалов и покрытий машиностроительного назначения // *Пластические массы*. 2020. № 7–8. С. 32–36. DOI: [10.35164/0554-2901-2020-7-8-32-36](https://doi.org/10.35164/0554-2901-2020-7-8-32-36).
8. Брянский А.А., Башков О.В., Белова И.В., Башкова Т.И. Исследование развивающихся повреждений при изгибном нагружении полимерных композиционных материалов и их идентификация методом акустической эмиссии // *Frontier Materials & Technologies*. 2022. № 2. С. 7–16. DOI: [10.18323/2782-4039-2022-2-7-16](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2022-2-7-16).
9. Wen S.-Z., Zhong S.-D., Kan W.-Q., Zhao P.-S., He Y.-C. Experimental and theoretical investigation on the hydrochromic property of Ni(II)-containing coordination polymer with an inclined 2D–3D polycatenation architecture // *Journal of Molecular Structure*. 2022. Vol. 1269. Article number 133753. DOI: [10.1016/j.molstruc.2022.133753](https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.133753).
10. Jin L., Cao W., Wang P., Song N., Din P. Interconnected MXene/Graphene network constructed by soft template for multi-performance improvement of polymer composites // *Nano-Micro Letters*. 2022. Vol. 14. № 1. Article number 133. DOI: [10.1007/s40820-022-00877-7](https://doi.org/10.1007/s40820-022-00877-7).
11. Robertson B.P., Calabrese M.A. Evaporation-controlled dripping-onto-substrate (DoS) extensional rheology of viscoelastic polymer solutions // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. № 1. Article number 4697. DOI: [10.1038/s41598-022-08448-x](https://doi.org/10.1038/s41598-022-08448-x).
12. Иваночкин П.Г., Больших И.В., Талахадзе Т.З., Больших Е.П. Применение антифрикционных полимерных композиционных полимерных покрытий в тормозной рычажной передаче локомотивов // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2022. № 1. С. 16–22. DOI: [10.46973/0201-727X_2022_1_16](https://doi.org/10.46973/0201-727X_2022_1_16).
13. Ivanochkin P.G., Manturov D.S., Danilchenko S.A., Karpenko K.I., Ivanochkina T.A. Study on the effect of the sealers on the steel surface layer modified by electrical discharge machining // *Solid State Phenomena*. 2021. Vol. 316 SSP. P. 713–719.
14. Брянский А.А., Башков О.В. Идентификация источников акустической эмиссии в полимерном композиционном материале в условиях циклического растяжения // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2021. № 3. С. 19–27. DOI: [10.18323/2073-5073-2021-3-19-27](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2021-3-19-27).
15. Saha S., Adachi Y. Shielding behavior of electrokinetic properties of polystyrene latex particle by the adsorption of neutral poly (ethylene oxide) // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2022. Vol. 626. P. 930–938. DOI: [10.1016/j.jcis.2022.06.154](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.06.154).
16. Иваночкин П.Г., Суворова Т.В., Данильченко С.А., Новиков Е.С., Беляк О.А. Комплексное исследование полимерных композитов с матрицей на основе фенилона С-2 // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2018. № 4. С. 18–25. EDN: [YTZDWP](https://www.edn.net/YTZDWP).
17. Egghe T., Ghoheira R., Morent R., Hoogenboom R., De Geyter N. Comparative study of the aging behavior of plasma activated hexamethyldisiloxane-based plasma polymers and silicone elastomer thin films // *Progress in Organic Coatings*. 2022. Vol. 172. Article number 107091. DOI: [10.1016/j.porgcoat.2022.107091](https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.107091).
18. Hu P., Xie R., Xie Q., Ma C., Zhang G. Simultaneous realization of antifouling, self-healing, and strong substrate adhesion via a bioinspired self-stratification strategy // *Chemical Engineering Journal*. 2022. Vol. 449. Article number 137875. DOI: [10.1016/j.cej.2022.137875](https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137875).
19. Khasyanova D.U., Mukutadze M.A., Zadorozhnaya N.S. 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 // *Journal of machinery manufacture and reliability*. 2021. Vol. 50. № 5. P. 405–411. DOI: [10.3103/S1052618821050083](https://doi.org/10.3103/S1052618821050083).
20. Хасьянова Д.У., Мукутадзе М.А. Повышение износостойкости радиального подшипника скольжения с металлическим покрытием // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2022. № 2. С. 41–46. DOI: [10.31857/S0235711922020067](https://doi.org/10.31857/S0235711922020067).

REFERENCES

1. Kokhanovskiy V.A., Kamerova E.A. Composites cover content fluor ethylene in the liquid lubricants. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmaxh*, 2014, no. 1, pp. 34–37. EDN: [RVQGBD](https://www.edn.net/RVQGBD).
2. Kokhanovskiy V.A., Kamerova E.A. Friction of the polymeric cover in the liquid lubricants. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmaxh*, 2014, no. 4, pp. 17–20. EDN: [SBJMAT](https://www.edn.net/SBJMAT).
3. Kamerova E.A., Vlasenko I.B., Snezhina N.G., Oganessian P.A. Methodology for studying the effect of liquid media on fluoropolymer-containing antifriction coatings. *Uralskiy nauchnyy vestnik*, 2014, no. 21, pp. 137–142.
4. Pavlycheva E.A. Development of polymer composition for obtaining a protective coating on metal. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*, 2022, no. 2, pp. 33–36. DOI: [10.17513/mjpf.13355](https://doi.org/10.17513/mjpf.13355).
5. Kondrashov S.V., Shashkeev K.A., Petrova G.N., Mekalina I.V. Constructional polymer composites with functional properties. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. S, pp. 405–419. DOI: [10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419](https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419).
6. Kuznetsov A.A., Semenova G.K., Svidchenko E.A. Engineering thermoplastics as a basic material of selflubricating polymer composites for antifriction purposes. *Voprosy materialovedeniya*, 2009, no. 1, pp. 116–126. EDN: [KUAIKL](https://www.edn.net/KUAIKL).

7. Negmatov S.S., Abed N.S., Saidakhmedov R.Kh. et al. Research of viscoelastic and adhesion-strength property and development of effective vibration absorbing composite polymeric materials and coatings of mechanical engineering purpose. *Plasticheskie massy*, 2020, no. 7–8, pp. 32–36. DOI: [10.35164/0554-2901-2020-7-8-32-36](https://doi.org/10.35164/0554-2901-2020-7-8-32-36).
8. Bryanskiy A.A., Bashkov O.V., Belova I.V., Bashkova T.I. Investigation of damages formed in polymer composite materials under bending loading and their identification by the acoustic emission technique. *Frontier Materials & Technologies*, 2022, no. 2, pp. 7–16. DOI: [10.18323/2782-4039-2022-2-7-16](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2022-2-7-16).
9. Wen S.-Z., Zhong S.-D., Kan W.-Q., Zhao P.-S., He Y.-C. Experimental and theoretical investigation on the hydrochromic property of Ni(II)-containing coordination polymer with an inclined 2D–3D polycatenation architecture. *Journal of Molecular Structure*, 2022, vol. 1269, article number 133753. DOI: [10.1016/j.molstruc.2022.133753](https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.133753).
10. Jin L., Cao W., Wang P., Song N., Din P. Interconnected MXene/Graphene network constructed by soft template for multi-performance improvement of polymer composites. *Nano-Micro Letters*, 2022, vol. 14, no. 1, article number 133. DOI: [10.1007/s40820-022-00877-7](https://doi.org/10.1007/s40820-022-00877-7).
11. Robertson B.P., Calabrese M.A. Evaporation-controlled dripping-onto-substrate (DoS) extensional rheology of viscoelastic polymer solutions. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, no. 1, article number 4697. DOI: [10.1038/s41598-022-08448-x](https://doi.org/10.1038/s41598-022-08448-x).
12. Ivanochkin P.G., Bolshikh I.V., Talakhadze T.Z., Bolshikh E.P. Application of antifriction polymer composite coatings in the brake lever transmission of locomotives. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putyey soobshcheniya*, 2022, no. 1, pp. 16–22. DOI: [10.46973/0201-727X_2022_1_16](https://doi.org/10.46973/0201-727X_2022_1_16).
13. Ivanochkin P.G., Manturov D.S., Danilchenko S.A., Karpenko K.I., Ivanochkina T.A. Study on the effect of the sealers on the steel surface layer modified by electrical discharge machining. *Solid State Phenomena*, 2021, vol. 316 SSP, pp. 713–719.
14. Bryanskiy A.A., Bashkov O.V. Identification of acoustic emission sources in a polymer composite material under the cycle tension loading. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, no. 3, pp. 19–27. DOI: [10.18323/2073-5073-2021-3-19-27](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2021-3-19-27).
15. Saha S., Adachi Y. Shielding behavior of electrokinetic properties of polystyrene latex particle by the adsorption of neutral poly (ethylene oxide). *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, vol. 626, pp. 930–938. DOI: [10.1016/j.jcis.2022.06.154](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.06.154).
16. Ivanochkin P.G., Suvorova T.V., Danilchenko S.A., Novikov E.S., Complex research of polymer composites with a matrix on the basis of phenilon C-2. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putyey soobshcheniya*, 2018, no. 4, pp. 18–25. EDN: [YTZDWP](https://www.edn.ru/ytzdwp/).
17. Egghe T., Ghobeira R., Morent R., Hoogenboom R., De Geyter N. Comparative study of the aging behavior of plasma activated hexamethyldisiloxane-based plasma polymers and silicone elastomer thin films. *Progress in Organic Coatings*, 2022, vol. 172, article number 107091. DOI: [10.1016/j.porgcoat.2022.107091](https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.107091).
18. Hu P., Xie R., Xie Q., Ma C., Zhang G. Simultaneous realization of antifouling, self-healing, and strong substrate adhesion via a bioinspired self-stratification strategy. *Chemical Engineering Journal*, 2022, vol. 449, article number 137875. DOI: [10.1016/j.cej.2022.137875](https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137875).
19. Khasyanova D.U., Mukutadze M.A., Zadorozhnaya N.S. 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. *Journal of machinery manufacture and reliability*, 2021, vol. 50, no. 5, pp. 405–411. DOI: [10.3103/S1052618821050083](https://doi.org/10.3103/S1052618821050083).
20. Khasyanova D.U., Mukutadze M.A. Increasing the wear resistance of a radial sliding bearing with a metal coating. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2022, no. 2, pp. 41–46. DOI: [10.31857/S0235711922020067](https://doi.org/10.31857/S0235711922020067).

Increasing the wear resistance of a radial bearing with a non-standard support profile and polymer coating on the shaft surface taking into account the pressure-viscosity ratio

© 2022

Khaidar N. Abdulrahman¹, PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor

Viktoria I. Kirishchieva², postgraduate student of Chair of Higher Mathematics

Murman A. Mukutadze^{*3}, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Head of Chair of Higher Mathematics

Valentina E. Shvedova⁴, postgraduate student of Chair of Higher Mathematics

Rostov State Transport University, Rostov-on-Don (Russia)

*E-mail: murman1963@yandex.ru¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1588-9311>²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7275-2576>³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2810-3047>⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8469-7671>

Received 10.08.2022

Accepted 18.10.2022

Abstract: The paper covers the development and analysis of a model of the true viscous lubricant movement in the working gap of a radial sliding bearing with a non-standard support profile having a fluoroplastic composite polymer coating with a groove on the shaft surface. The authors obtained new models based on the classical equation in the appro-

ximation for the “thin layer” and the continuity equation describing the laminar pattern of movement of a lubricant with the viscous rheological properties. The results of the numerical analysis of the developed models allowed obtaining a quantitative assessment of the efficiency of the bearing bush support profile and the polymer-coated shaft with an axial groove. To complete the set of studies and verify theoretical insights, the authors carried out the experimental research. The novelty of the work lies in the development of an engineering calculation technique that allows determining the magnitude of the main tribotechnical parameters of a radial sliding bearing (hydrodynamic pressure, load capacity, and friction ratio) and expanding the area of practical application of the developed engineering calculations. The design of the radial bearing with a fluoroplastic antifriction composite polymer coating, a 3 mm wide groove, and a special support profile ensured the stable shaft ascent on the hydrodynamic wedge, which experimentally confirmed the correctness of the results of theoretical studies of sliding bearings with a diameter of 40 mm at a sliding speed of 0.3–3 m/s and a load of 13–65 MPa.

Keywords: radial bearing; wear resistance increase; antifriction polymer composite coating; groove; hydrodynamic mode; verification; pressure-viscosity ratio.

For citation: Abdulrahman Kh.N., Kirishchieva V.I., Mukutadze M.A., Shvedova V.E. Increasing the wear resistance of a radial bearing with a non-standard support profile and polymer coating on the shaft surface taking into account the pressure-viscosity ratio. *Frontier Materials & Technologies*, 2022, no. 4, pp. 9–17. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-4-9-17.