

УДК 621.822.17
DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-5-13
EDN: NZPADZ

М. А. МУКУТАДЗЕ
П. В. ХАРЛАМОВ
В. М. ПРИХОДЬКО
Е. А. БОЛГОВА
В. Е. ШВЕДОВА

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

ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА С УЧЕТОМ СЖИМАЕМОСТИ И ВЯЗКОСТИ МИКРОПОЛЯРНОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА

Данное исследование включает разработку и анализ математической модели течения микрополярного смазочного материала в рабочем зазоре модифицированной конструкции бесконечного радиального подшипника скольжения с учетом сжимаемости и влияния давления на реологические свойства смазочного материала.

Рассматривая сжимаемость смазочного материала, авторы учитывали зависимость вязкости и плотности смазочного вещества от высокого давления. В условиях, типичных для радиальных подшипников, значительные нагрузки могут вызывать изменения в свойствах смазочного материала, что, в свою очередь, влияет на его способность к формированию устойчивой смазывающей пленки. Поэтому введение параметров сжимаемости в модель позволяет более точно предсказать поведение смазочного вещества и эффективность смазки в различных режимах работы.

Новая модель разработана общеизвестными уравнениями течения микрополярного смазочного вещества, уравнением неразрывности и уравнением состояния.

Проведен сравнительный анализ численного результата теоретических моделей и экспериментального исследования. Таким образом, данная работа может представлять весомый вклад в область исследования радиальных подшипников. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего совершенствования конструкций подшипников, позволяющего увеличить их надежность и долговечность.

Ключевые слова: модифицированная конструкция радиального подшипника, оценка износостойкости, антифрикционное полимерное покрытие, ламинарный режим течения, микрополярный смазочный материал, гидродинамический режим течения.

Введение. Для повышения надежности опор скольжения необходимо глубокое понимание структурных и динамических нагрузок, которым они подвергаются в процессе эксплуатации. Технологические достижения в области химии и материаловедения позволили создать новые виды смазок, которые существенно уменьшают трение и износ. Это достигается путем введения в полимеры различных наполнителей, включая твердые смазки, такие как графит, дисульфид молибдена или углеродные нанотрубки. Такие композиты обладают значительно улучшенной износостойкостью и могут противостоять сложным воздействиям, характерным для промышленных трибосистем.

Применение жидких смазок расширяет диапазон скоростей, при которых материал может эффективно работать, поскольку это позволяет переходить от граничного трения к жидкостному трению в условиях гидродинамики. В момент запуска или остановки будут действовать защитные покрытия, а в период стационарной работы — самосмазочный материал.

Современные разработки в области полимерных покрытий сосредоточены на модификации базовых материалов с целью совершенствования их трибологических характеристик. Исследования показывают, что такие покрытия способны работать в условиях без смазки, что значительно упрощает эксплуатацию механизмов и снижает эксплуатационные затраты.

Хотя фторопласт (ПТФЭ) известен своими замечательными антифрикционными свойствами и способностью функционировать в узлах трения без дополнительного смазывания, значительного повышения его износостойкости можно достичь при использовании дополнительных смазочных материалов.

На этапе проектирования критически важно учитывать взаимодействие различных материалов и покрытий, анализировать их поведение под воздействием высоких температур и скоростей. Чтобы достичь максимальной эффективности, требуется учитывать влияние внешних факторов, таких как температура, давление и сжимаемость в комплексе.

Как известно, сжимаемость жидкости отрицательно влияет на энергетику и динамику, обуславливает уменьшение подачи и объемного КПД, ухудшает быстродействие гидродвигателя узлов трения, а также неустойчивого движения при большой массе.

Поэтому гидродинамический расчет подшипников скольжения без учета сжимаемости считается некорректным, что придает этому параметру первостепенное значение.

Полимерное покрытие с канавкой на поверхности подшипника выполняет несколько ключевых функций. Во-первых, канавка способствует более равномерному распределению смазочного вещества по поверхности подшипника, что минимизирует риск образования сухого трения. Во-вторых, наличие канавки способствует более эффективному отводу тепла, что предотвращает перегрев рабочей зоны и уменьшает износ подшипника.

Проведенные трибологические испытания втулок с нанесенными антифрикционными полимерными покрытиями [1–4] демонстрируют значительное снижение коэффициента трения по сравнению с обычными стальными втулками. Это подтверждает целесообразность их применения в узлах, подвергающихся интенсивным эксплуатационным на-

грузкам. Применение композитов, содержащих высокопрочные волокна и армирующие элементы, позволило значительно улучшить механическую прочность и теплопроводность изделий, что важно для предотвращения перегрева и преждевременного выхода узлов из строя.

На этапе проектирования очень важно учитывать взаимодействие различных материалов и покрытий [5–9], проанализировать их поведение под воздействием высоких нагрузок, скоростей и температур.

Для успешного применения полимеров [10–13] в трибосопряжениях технологических машин необходимо учитывать специфические особенности каждой трибосистемы. Игнорирование этих особенностей может привести к снижению эффективности подходов, разработанных в исследованиях.

Экспериментальные данные [14–20] свидетельствуют о том, что переменные величины, такие как концентрация наполнителя и температура отверждения, оказывают значительное влияние на характер акустической эмиссии и, как следствие, на эксплуатационные характеристики конечного материала. Авторы отмечают, что дальнейшие исследования в этом направлении могут расширить возможности использования полимерных композитов, предоставив более универсальные решения для различных отраслей промышленности.

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод, что внедрение антифрикционных полимерных композиционных покрытий открывает новые перспективы в повышении надежности и эффективности промышленного оборудования.

Гидродинамический расчет подшипников скольжения без учета сжимаемости смазочного материала является принципиально некорректным. Исследование сжимаемости смазочного материала для трибозулов машин и механизмов представляет собой важный и актуальный аспект указанных расчетов.

Анализ работ, посвященных экспериментальному исследованию сжимаемости жидкостей в интервале температур и давления различными приемами, показывает, что предложенный новый метод способен дать надежные параметры в широком диапазоне давления и температур. А также сопоставление данных о внутреннем давлении жидкости, полученных разными способами, приводит к выводу о наличии довольно большого количества ошибок в их определении. В связи с этим исследование способов повышения эксплуатационных характеристик подшипников скольжения является актуальным и востребованным.

Целью исследования является уточнение ранее полученных результатов [21] с учетом сжимаемости смазочного материала.

Постановка задачи. Течение сжимаемого микрополярного смазочного материала происходит в рабочем зазоре модифицированной конструкции радиального подшипника.

В принятом расположении полярной системы координат (рис. 1) уравнения контура вала, подшипниковой втулки под покрытием и полимерного покрытия, копирующего опорный профиль втулки, запишем в виде:

$$r' = r_0(1 + H), \quad r' = r_1, \quad r' = r_1 - \tilde{h}. \quad (1)$$

Вязкостные характеристики, зависящие от давления, отражены в выражении

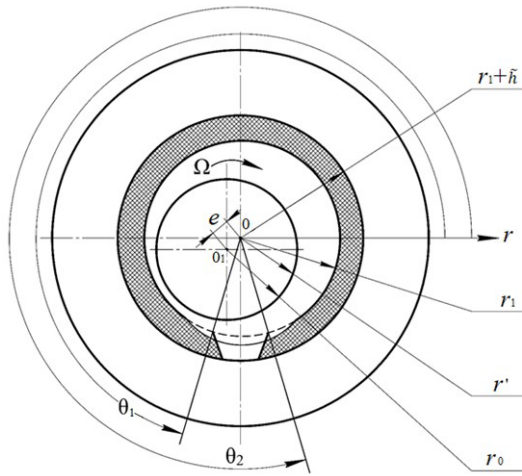


Рис. 1. Схема трибоконтакта

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

Разработка математической модели. Для оценки износостойкости модифицированной конструкции подшипника использованы с учетом (2) уравнение течения сжимаемого микрополярного смазочного материала для случая «тонкого слоя», уравнение неразрывности [21] и уравнение состояния с соответствующими граничными условиями:

$$\begin{aligned} (2\mu' + \kappa') \left(\frac{\partial^2 v_{\theta_i}}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v_{\theta_i}}{\partial r'} \right) &= \frac{1}{r'} \frac{dp'_i}{d\theta} - \kappa' \frac{\partial v_{r'_i}}{\partial r'}, \\ \gamma' \left(\frac{\partial^2 v'_i}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v'_i}{\partial r'} \right) &= \kappa' v'_i + \kappa' \frac{\partial v_{\theta_i}}{\partial r'}, \\ \frac{\partial(\rho' v'_{r'_i})}{\partial r'} + \frac{(\rho' v'_{r'_i})}{r'} + \frac{1}{r'} \frac{\partial(\rho' v_{\theta_i})}{\partial \theta} &= 0, \\ p' &= \frac{\lambda \Omega^2 r'^2}{2} \rho'. \end{aligned} \quad (3)$$

$v_{\theta} = 0, \quad v_{r'} = 0$ при $r' = r_1$ — скорость течения смазочного материала на поверхности подшипниковой втулки;

$v_{\theta} = v'(\theta), \quad v_{r'} = u'(\theta)$ при $r' = r_1 - \tilde{h}$ — скорость течения смазочного материала на поверхности полимерного покрытия подшипниковой втулки;

$v_{\theta} = r_0 \Omega, \quad v_{r'} = -\Omega e \sin \theta$ при $r' = r_0 + e \cos \theta$ — скорость течения смазочного материала на поверхности вала;

$$p'(0) = p'(\theta) = p_g. \quad (4)$$

Для удобства расчета применим переход к безразмерным величинам:

$$r' = r_1 - \delta r, \quad \delta = r_1 - r_0, \quad r' = (r_1 - \tilde{h}) - \delta r,$$

$$\delta = (r_1 - \tilde{h}) - r_0, \quad v_{\theta_i} = \Omega r_0 v_i, \quad v_{r'_i} = \Omega \delta u_i,$$

$$p' = p \cdot p, \quad p' = \frac{(2\mu_0 + \kappa_0) \Omega r_0^2}{2\delta^2},$$

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

$$\rho' = \frac{2p_g}{\lambda \Omega^2 r_0^2}, \quad \rho' = \rho \cdot \rho,$$

$$N^2 = \frac{\kappa_0}{2\mu_0 + \kappa_0}, \quad N_1 = \frac{2\mu_0 l^2}{\delta^2 \kappa_0}, \quad l^2 = \frac{\gamma_0}{4\mu_0}. \quad (5)$$

В результате произведенных преобразований (5), опираясь на уравнения (3) и (4), мы получили выражения:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + N^2 \frac{\partial v_i}{\partial r} = \frac{1}{\Lambda} \cdot e^{-\alpha p} \frac{dp_i}{d\theta},$$

$$\frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} - \frac{v_i}{N_1} - \frac{1}{N_1} \cdot \frac{du_i}{dr} = 0,$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial r} = 0, \quad p = \rho.$$

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

$$v = 0, \quad u = 0, \quad v = 0 \text{ при } r = 0, \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2;$$

$$v = v(\theta), \quad u = u(\theta), \quad v = 0 \text{ при } r = \eta_2,$$

$$0 \leq \theta \leq \theta_1, \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi;$$

$$p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p};$$

$$Q = \text{const}, \quad p_3(\theta_2) = p_2(\theta_2), \quad p_1(\theta_1) = p_2(\theta_1). \quad (6)$$

Для сжимаемого смазочного материала пренебрегаем $\frac{1}{N_1} \ll 1$, а также учтем малость зазора, тогда уравнение (6) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + \frac{N_i^2}{2h} (2r - h) = \frac{1}{\Lambda} \cdot e^{-\alpha p} \frac{dp_i}{d\theta},$$

$$v_i = \frac{1}{2h} (r^2 - rh), \quad \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial r} = 0, \quad p = \rho. \quad (7)$$

Введем обозначения $z = e^{-\alpha p}$, и в результате ряда преобразований система уравнений (7) примет вид

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + \frac{N_i^2}{2h} (2r - h) = -\frac{1}{\alpha} \frac{dz_i}{d\theta},$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial r} = 0,$$

$$p = \rho, \quad v_i = \frac{1}{2h} (r^2 - rh) \quad (8)$$

с соответствующими граничными условиями

$$v = 1, \quad u = -\eta \sin \theta \text{ при } r = h(\theta),$$

$$v = v'(0), \quad u = u'(0) \text{ при } r = \eta_2, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \text{ и } \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi,$$

$$v = 0; \quad u = 0 \text{ при } r = 0, \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2,$$

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

Автомодельное решение (8) ищем по известному методу [22]:

$$\begin{aligned} \rho v_i &= \frac{\partial \psi_i}{\partial r} + V_i(r, \theta), & \rho u_i &= -\frac{\partial \psi_i}{\partial \theta} + U_i(r, \theta), \\ \psi_i(r, \theta) &= \tilde{\psi}_i(\xi_i), & V_i(r, \theta) &= p \tilde{v}_i(\xi_i), \\ U_i(r, \theta) &= -p \tilde{u}_i(\xi_i) \cdot h'(\theta), \\ \xi_i &= \frac{r_i}{h(\theta)} \text{ при } 0 \leq \theta \leq \theta_1 \text{ и } \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi, \\ \xi_i &= \frac{r - \eta_2}{h(\theta) - \eta_2} \text{ при } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2. \\ u_i'(\xi_i) + \frac{h(\theta)}{h'(\theta)} \frac{1}{p} \frac{dp}{d\theta} - \xi_i \tilde{v}_i'(\xi_i) &= 0, \\ \frac{dz_i}{d\theta} &= -\alpha \left(\frac{b_i}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{a_i}{(h(\theta) - \eta_2)^3} \right), \quad i = 1, 3, \\ \frac{dz_2}{d\theta} &= -\alpha \left(\frac{b_2}{h^2(\theta)} + \frac{a_2}{h^3(\theta)} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Интегрируя (10), для поля скоростей и гидродинамического давления имеем аналитические выражения:

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_1'(\xi_1) &= a_1 \frac{\xi_1}{2} (\xi_1 - 1), \quad \tilde{u}_1(\xi_1) = \\ &= b_1 \frac{\xi_1^2}{2} - \frac{N^2}{2} \left(\frac{\xi_1^3}{3} - \frac{\xi_1^2}{2} \right) - \left(\frac{N^2}{12} + \frac{b_1}{2} + 1 \right) \xi_1, \\ \tilde{\psi}_2'(\xi_2) &= a_2 \frac{\xi_2}{2} (\xi_2 - 1), \quad \tilde{u}_2(\xi_2) = \\ &= b_2 \frac{\xi_2^2}{2} - \frac{N^2}{2} \left(\frac{\xi_2^3}{3} - \frac{\xi_2^2}{2} \right) - \left(\frac{N^2}{12} + \frac{b_2}{2} + 1 \right) \xi_2 + 1, \\ \tilde{\psi}_3'(\xi_3) &= a_3 \frac{\xi_3}{2} (\xi_3 - 1), \quad \tilde{u}_3(\xi_3) = \\ &= b_3 \frac{\xi_3^2}{2} - \frac{N^2}{2} \left(\frac{\xi_3^3}{3} - \frac{\xi_3^2}{2} \right) - \left(\frac{N^2}{12} + \frac{b_3}{2} + 1 \right) \xi_3 + 1, \\ p_1 &= \frac{p_g}{p^*} + \frac{6\Lambda}{(1 - \eta_2)^2} \left(\theta + 2\tilde{\eta} \sin \theta - \frac{2\sqrt{1 - \tilde{\eta}^2}}{2 + \tilde{\eta}^2} \right) \times \\ &\times \left(\theta + 3\eta \sin \theta \right) \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right), \\ p_2 &= \frac{p_g}{p^*} + 6\Lambda(\theta - \theta_1) \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \times \\ &\times \left[1 + \frac{2\eta}{\theta - \theta_1} (\sin \theta - \sin \theta_1) - \frac{1}{p} \left(1 - \frac{\eta}{\theta_1} \sin \theta_1 \right) \right] \times \\ &\times \left(1 + \frac{2\eta}{\theta - \theta_1} (\sin \theta - \sin \theta_1) \right), \\ p_3 &= \frac{p_g}{p^*} + \frac{6\Lambda(\theta - \theta_2)}{(1 - \eta_2)^2} \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \times \\ &\times \left[1 + \frac{2\tilde{\eta}}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2) - \frac{1}{p} \left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 \right) \right] \times \\ &\times \left(1 + \frac{3\tilde{\eta}}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2) \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Интегрируя (11) методом последовательных приближений, получим:

$$\begin{aligned} p_{11} &= 1, & p_{21} &= 1, & p_{31} &= 1. \\ p_{12} &= \frac{6\Lambda}{(1 - \eta_2)^2} \left(\theta + 2\tilde{\eta} \sin \theta - 2 \frac{\sqrt{1 - \tilde{\eta}^2}}{2 + \tilde{\eta}^2} \right) \times \\ &\times \left(\theta + 3\eta \sin \theta \right) \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right), \\ p_{22} &= 6\Lambda(\theta - \theta_1) \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \times \\ &\times \left[1 + \frac{2\eta}{\theta - \theta_1} (\sin \theta - \sin \theta_1) - \left(1 - \frac{\eta}{\theta_1} \sin \theta_1 \right) \right] \times \\ &\times \left(1 + \frac{2\eta}{\theta - \theta_1} (\sin \theta - \sin \theta_1) \right), \\ p_{32} &= \frac{6\Lambda(\theta - \theta_2)}{(1 - \eta_2)^2} \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \times \\ &\times \left[1 + \frac{2\tilde{\eta}}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2) - \left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 \right) \right] \times \\ &\times \left(1 + \frac{3\tilde{\eta}}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2) \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Для определения несущей способности и силы трения используем формулу (12):

$$\begin{aligned} R_x &= \frac{6\mu_0 r_0^3 \Omega}{2\delta^2} \left[\int_0^{\theta_1} p_{12} \cos \theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} p_{22} \cos \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} p_{32} \cos \theta d\theta \right], \\ R_y &= \frac{6\mu_0 \omega_0^3}{2\delta^2} \left[\int_0^{\theta_1} p_{12} \sin \theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} p_{22} \sin \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} p_{32} \sin \theta d\theta \right], \\ L_{TP} &= \mu \left(1 + \alpha p - \frac{\alpha^2}{2} p^2 \right) \left[\int_0^{\theta_1} \frac{1}{p} \left(\frac{\tilde{\psi}_1''(0)}{h^2(0)} + \frac{\tilde{v}_1'(0)}{h(0)} \right) d\theta + \right. \\ &+ \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{1}{p} \left(\frac{\tilde{\psi}_2''(0)}{(h(\theta) + \tilde{h})^2} + \frac{\tilde{v}_2'(0)}{(h(\theta) + \tilde{h})^3} \right) d\theta + \\ &\left. + \int_{\theta_2}^{2\pi} \frac{1}{p} \left(\frac{\tilde{\psi}_3''(0)}{h(\theta)} + \frac{\tilde{v}_3'(0)}{h(\theta)} \right) d\theta \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Проведенные проверки подтвердили надежность предложенной теоретической модели в указанных диапазонах параметров.

В частности, значения параметра сжимаемости $\Lambda = 0, 1 - 0,9$, напряжения σ в диапазоне 4–20 МПа были тщательно протестированы, чтобы убедиться в точности и применимости модели в широком диапазоне сценариев (табл. 1).

Экспериментальная часть. Экспериментальное исследование состоит из: верификации разработанной расчетной модели радиального подшипника скольжения с оптимальным сечением маслоподдерживающей канавки и определение величины погрешности; комплекс экспериментального исследования подшипника с новой разработанной конструкцией опорной поверхности подшипниковой втулки. Это несущая поверхность с антифрикционным полимерным композиционным покрытием, имеющим маслоподдерживающую ка-

Результаты теоретического исследования

№	σ , МПа	Параметр сжимаемости А				
		0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
		Коэффициент трения				
1	4	0,0095	0,0130	0,0091	0,0078	0,0052
2	8	0,0073	0,0074	0,0075	0,0058	0,0044
3	12	0,0050	0,0042	0,0041	0,00207	0,00204
4	16	0,0039	0,0041	0,0040	0,00201	0,00202
5	20	0,00208	0,0040	0,0039	0,00205	0,00201

Таблица 2

Сравнительный анализ результатов исследования

№ п/п	Режим		Теоретический результат		Экспериментальное исследование	Погрешность теоретического (с учетом сжимаемости) экспериментального исследования
	σ , МПа	V, м/с	без учета сжимаемости	с учетом сжимаемости		
1	4	0,3	0,0170	0,0152	0,0153	0,6–2,5 %
2	8	0,3	0,0215	0,0098	0,0097	
3	12	0,3	0,0095	0,0076	0,0078	
4	16	0,3	0,0210	0,0086	0,0087	
5	20	0,3	0,0219	0,0150	0,0151	

навку, а также профиль, контур которого адаптирован к конкретным условиям трения.

В процессе этих исследований установлена область их рационального применения. 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 модели ИИ5018 на образцах в виде частичных вкладышей. Колодки вырезались из кольцевой заготовки по центральному углу, равному 60 градусов. На их рабочие поверхности наносились полимерные композиционные покрытия и канавки вдоль оси трибосопряжения на глубину покрытия. Кроме того, колодки имеют отверстия для термопар.

Эксперименты проводились при различных режимах работы (табл. 2), включая изменения скорости вращения, нагрузки и температурные условия, позволяющие значительно уменьшить износ и улучшить тепловыделение, что способствует повышению надежности и уменьшению простоев в работе механизмов.

Проведенные испытания с использованием как традиционных методов измерения трения и износа, так и современных инструментальных методов позволили получить высокоточные измерения, что, в свою очередь, помогло более глубоко понять механизмы трения и износа в новой конструкции.

Результаты исследования. Теоретическое исследование позволило получить более точные данные,

что имеет большое значение для их эффективного применения в различных инженерных системах. Уточнены несущая способность на 5–7 %, а коэффициент трения — на 6–8 %. В дальнейших исследованиях представляется целесообразным изучение дополнительных факторов, таких как температурные условия, динамические нагрузки и взаимодействие с различными смазочными материалами, позволяющее продолжать совершенствовать конструкции таких подшипников и расширять области их применения.

Данные эксперимента показали наличие колебаний коэффициента трения, которое связано с динамическими изменениями в условиях контакта поверхностей и воздействиями внешних параметров. Такое поведение коэффициента трения при увеличении нагрузки указывает на сложность взаимодействий в системе, особенно с учетом того, что максимальная нагрузка достигала 20 МПа, что эквивалентно ступенчатому увеличению нагрузки в 5 раз.

Результаты проведенного исследования подтверждают эффективность разработанных теоретических моделей.

Выводы

1. Проведенное исследование привело к значительному расширению возможностей практического использования расчетных моделей радиального подшипника скольжения и позволяет на практике оценивать его критически важные эксплуатационные характеристики.

2. Исследование радиальных подшипников скольжения, принимающих в учет сжимаемость, показало значительное улучшение их эксплуатационных характеристик. Результаты исследований демонстрируют, что несущая способность таких подшипников уточняется на 5–7 %, а коэффициент

трения — на 6–8 %. Этот прогресс не только выявляет важные конструкционные аспекты, но и открывает новые перспективы для применения таких подшипников в различных инженерных сферах.

Обсуждение и заключение. С учетом ранее установленных параметров канавок была разработана расчетная модель, детально описывающая поведение подшипника в гидродинамическом режиме. Особое внимание уделено сжимаемости истинно вязкого смазочного материала, параметры вязкости которого зависят от давления и условий трения.

Итогом проведенного исследования стала возможность устанавливать основные эксплуатационные характеристики подшипника на этапе проектирования, что существенно повышает его надежность и долговечность, что является важным шагом в развитии технологий подшипников и смазочных материалов, предоставляя инженерам эффективные инструменты для оптимизации их работы.

Условные обозначения: r_0 — радиус вала с полимерным покрытием, м; r_1 — радиус подшипниковой втулки, м; e — эксцентриситет; ε — относительный эксцентриситет; h — высота канавки, м; μ' — коэффициент динамической вязкости смазочного материала, Нм/с²; κ' , γ' — коэффициенты вязкости микрополярного смазочного материала, Нм/с²; μ_0 — характерная вязкость неньютоновского смазочного материала, Нм/с²; α' — экспериментальная постоянная величина; p' — гидродинамическое давление в смазочном слое, Па; κ_0 , γ_0 — характерная вязкость микрополярного смазочного материала, Нм/с²; v_{θ_1} , v_{r_1} — компоненты вектора скорости смазочной среды, м/с; Λ — параметр сжимаемости;

$\eta = \frac{l}{\delta}$ — конструктивный параметр; $\eta_2 = \frac{\tilde{h}}{\delta}$ — конструктивный параметр, характеризующий канавку; θ_1 , θ_2 — соответственно угловые координаты канавки; $u^*(\theta)$ и $v^*(\theta)$ — известные функции, обусловленные наличием полимерного покрытия на поверхности подшипниковой втулки; Q — расход смазочного материала в единицу времени.

Библиографический список

1. Isaacs N. S. Liquid phase high pressure chemistry. New York, Chichester Brisbane, Toronto: Wiley-Interscience, 1981. 414 p.
2. le Noble W. H. Organic high pressure chemistry. Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo: Elsevier, 1988. 489 p.
3. Marcus Y., Hefter G. T. The compressibility of liquids at ambient temperature and pressure // Journal of Molecular Liquids. 1997. No. 73–74. P. 61–74. DOI: 10.1016/S0167-7322(97)00057-3.
4. Kiselev V. D., Kashaeva E. A., Konovalov A. I. Pressure effect on the rate and equilibrium constant of the Diels-Alder reaction 9-chloroanthracene with tetracyanoethylene // Tetrahedron. 1999. Vol. 55. P. 1153–1162.
5. Polyakov R., Savin L. The method of long-life calculation for a friction couple «rotor-hybrid bearing» // Proceedings of the 7th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering, Coupled Problems 2017, Rhodes Island, June 12–14. 2017. P. 433–440. EDN: XXXKOLJ.
6. Polyakov R. Predictive analysis of rotor machines fluid-film bearings operability // Vibroengineering Procedia. 2020. Vol. 30 (3). P. 61–67. DOI: 10.21595/vp.2020.21379.
7. Kornaeva E. P. Application of artificial neural networks to diagnostics of fluid-film bearing lubrication // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 734. P. 012154. DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012154. EDN: UARRFL.
8. Shutin D. V., Polyakov R. N. Active hybrid bearings as mean for improving stability and diagnostics of heavy rotors of power generating machinery // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 862. P. 032098. DOI: 10.1088/1757-899X/862/3/032098.
9. Поляков Р. Н., Савин Л. А., Внуков А. В. Математическая модель бесконтактного пальчикового уплотнения с активным управлением зазором // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2018. № 1 (327). С. 66–71. EDN: XXRSCT.
10. Негматов С. С., Абад 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. EDN: MEIYAF.
11. Сайфуллаева Г. И., Негматов С. С., Абад Н. С., Камалова Д. И. Исследование электропроводящих композиционных терморезистивных полимерных материалов и покрытий на их основе для триботехнического назначения // Universum: технические науки: электрон. науч. журн. 2020. № 12 (81). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11102> (дата обращения: 20.06.2024).
12. Ерофеев В. Т., Смирнов И. В., Воронов П. В. [и др.]. Исследование стойкости полимерных покрытий в условиях воздействия климатических факторов черноморского побережья // Фундаментальные исследования. 2016. № 11-5. С. 911–924. EDN: XSDHNB. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41277> (дата обращения: 20.06.2024).
13. Икромов Н. А., Расулов Д. Н. Объекты и методики исследования композиционных полимерных материалов // Современные научные исследования и инновации. 2020. № 10. EDN: ТМУНПК. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2020/10/93640> (дата обращения: 20.06.2024).
14. Zinoviev V. E. Analysis of factor affecting the strength of fixed bonds assembled using metal-polymer compositions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 900 (1). P. 012009. DOI: 10.1088/1757-899X/900/1/012009. EDN: TLACUN.
15. Cibulka I., Hnedkovsky L., Takagi T. P- ρ -T data of liquids: summarization and evaluation. 4. Higher 1-alkanols (C11, C12, C14, C16), secondary, tertiary, and branched alkanols, cycloalkanoles, alkanediols, alkanetriols, ether alkanols, and aromatic hydroxy derivatives // Journal of Chemical & Engineering Data. 1997. Vol. 42. P. 415–433. DOI: 10.1021/JE960389Z.
16. Cibulka I., Takagi T. P- ρ -T data of liquids: summarization and evaluation. 5. Aromatic hydrocarbons // Journal of Chemical & Engineering Data. 1999. Vol. 44. P. 411–429. DOI: 10.1021/je960199o.
17. Cibulka I., Zikova M. Liquid densities at elevated pressures of 1-alkanols from C1 to C10: a critical evaluation of experimental data // Journal of Chemical & Engineering Data. 1994. Vol. 39 (4). P. 876–886. DOI: 10.1021/je00016a055.
18. Cibulka I., Hnedkovsky L. Liquid densities at elevated pressures of n-alkanes from C5 to C16: a critical evaluation of experimental data // Journal of Chemical & Engineering Data. 1996. Vol. 41. P. 657–668. DOI: 10.1021/je960058m.
19. Shapovalov V. V., Kolesnikov V. I., Kharlamov P. V. [et al.]. Improving the efficiency of the path — rolling stock system based on the implementation of anisotropic frictional bonds // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 900 (1). P. 012011. DOI: 10.1088/1757-899X/900/1/012011. EDN: KJDDLF.
20. Cibulka I., Hnedkovsky L., Takagi T. P- ρ -T data of liquids: summarization and evaluation. 3. Ethers, ketones, aldehydes, carboxylic acids, and esters // Journal of Chemical & Engineering Data. 1997. Vol. 42. P. 2–26. DOI: 10.1021/je960199o.
21. Кирищива В. И., Мукутадзе М. А. Исследование износостойкости радиального подшипника с полимерным покрытием, работающего на микрополярном смазочном материале // Омский научный вестник. 2022. № 4 (184). С. 41–45. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-184-41-45. EDN: DXLWGM.

22. Мукутадзе М. А., Абдулрахман Х. Н., Шведова В. Е. [и др.]. Исследования на износостойкость конструкции радиального подшипника с учетом реологических свойств микрополярного смазочного материала // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 5–14. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-5-14. EDN: IKFMSX.

МУКУТАДЗЕ Мурман Александрович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Высшая математика» Ростовского государственного университета путей сообщения» (РГУПС), г. Ростов-на-Дону.
SPIN-код: 9636-3223
AuthorID (РИНЦ): 389305
ORCID: 0000-0003-2910-3047
AuthorID (SCOPUS): 55049709500
ResearcherID: AAI-2420-2021

Адрес для переписки: murman1963@yandex.ru

ХАРЛАМОВ Павел Викторович, доктор технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Транспортные машины и триботехника» РГУПС, г. Ростов-на-Дону.

ORCID: 0000-0001-5100-4894
AuthorID (SCOPUS): 57191516687

Адрес для переписки: pvharlamov@rgups.ru

ПРИХОДЬКО Виктор Маркович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий ка-

федрой «Начертательная геометрия и графика» РГУПС, г. Ростов-на-Дону.

ORCID: 0000-0002-0907-9320

Адрес для переписки: v.m.prikhodko@yandex.ru

БОЛГОВА Екатерина Александровна, аспирант кафедры «Высшая математика» РГУПС, г. Ростов-на-Дону.

ORCID: 0000-0002-0737-1846

Адрес для переписки: bolgova_katya@mail.ru

ШВЕДОВА Валентина Евгеньевна, аспирант кафедры «Высшая математика» РГУПС, г. Ростов-на-Дону.

ORCID: 0000-0002-8469-7671

Адрес для переписки: shvedovavalya@yandex.ru

Для цитирования

Мукутадзе М. А., Харламов П. В., Приходько В. М., Болгова Е. А., Шведова В. Е. Оценка износостойкости модифицированной конструкции радиального подшипника с учетом сжимаемости и вязкости микрополярного смазочного материала // Омский научный вестник. 2024. № 4 (192). С. 5–13. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-5-13.

Статья поступила в редакцию 25.06.2024 г.

© М. А. Мукутадзе, П. В. Харламов, В. М. Приходько, Е. А. Болгова, В. Е. Шведова

EVALUATION OF THE WEAR RESISTANCE OF THE MODIFIED RADIAL BEARING DESIGN CONSIDERING THE COMPRESSIBILITY AND VISCOSITY OF THE MICROPOLAR LUBRICANT

The research includes the development and analysis of a mathematical model of the micropolar lubricant flow in the working gap of a modified design of an infinite radial sliding bearing, taking into account compressibility and the effect of pressure on the rheological properties of the lubricant. Considering the lubricant compressibility, the authors took into account the dependence of the viscosity and density of the lubricant on high pressure. Under typical conditions of radial bearings, significant loads can cause changes in the properties of the lubricant, which affects its ability to form a stable lubricating film. Therefore, the introduction of compressibility parameters into the model allows more accurately predicting the behavior of the lubricant and the effectiveness of lubrication in various operating modes. The new model has been developed by the well-known equations of the flow of a micropolar lubricant, the continuity and the state equation. A comparative analysis of the numerical result of theoretical models and experimental research is carried out. Thus, the research represents a significant contribution to the field of radial bearings sphere. The obtained results can be used for further improvement of bearing designs, which allows increasing their reliability and durability of mechanical engineering.

Keywords: modified radial bearing design, wear resistance assessment, antifriction polymer coating, laminar flow mode, micropolar lubricant, hydrodynamic flow mode.

References

1. Isaacs N. S. Liquid phase high pressure chemistry. New York, Chichester Brisbane, Toronto: Wiley-Interscience, 1981. 414 p. (In Engl.).
2. le Noble W. H. Organic high pressure chemistry. Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo: Elsevier, 1988. 489 p. (In Engl.).
3. Marcus Y., Hefter G. T. The compressibility of liquids at ambient temperature and pressure // *Journal of Molecular Liquids*. 1997. No. 73–74. P. 61–74. DOI: 10.1016/S0167-7322(97)00057-3. (In Engl.).
4. Kiselev V. D., Kashaeva E. A., Konovalov A. I. Pressure effect on the rate and equilibrium constant of the Diels-Alder reaction 9-chloroanthracene with tetracyanoethylene // *Tetrahedron*. 1999. Vol. 55. P. 1153–1162. (In Engl.).
5. Polyakov R., Savin L. The method of long-life calculation for a friction couple «rotor-hybrid bearing» // *Proceedings of the 7th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering, Coupled Problems 2017*, Rhodes Island, June 12–14. 2017. P. 433–440. EDN: XXKOLJ. (In Engl.).
6. Polyakov R. Predictive analysis of rotor machines fluid-film bearings operability // *Vibroengineering Procedia*. 2020. Vol. 30 (3). P. 61–67. DOI: 10.21595/vp.2020.21379. (In Engl.).
7. Kornaeva E. P. Application of artificial neural networks to diagnostics of fluid-film bearing lubrication // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 734. P. 012154. DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012154. EDN: UARRFL. (In Engl.).
8. Shutin D. V., Polyakov R. N. Active hybrid bearings as mean for improving stability and diagnostics of heavy rotors of power generating machinery // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 862. P. 032098. DOI: 10.1088/1757-899X/862/3/032098. (In Engl.).
9. Polyakov R. N., Savin L. A., Vnukov A. V. Matematicheskaya model' beskontaktnogo pal'chikovogo uplotneniya s aktivnym upravleniyem zazorom [Mathematical model of the inflammatory pullic seal with active management of the clearance] //

Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. 2018. No. 1 (327). P. 66–71. EDN: XXRSCT. (In Russ.).

10. Negmatov S. S., Abed N. S., Saidakhmedov R. Kh. [et al.]. Issledovaniye vyazkoprugikh i adgezionno-prochnostnykh svoystv i razrabotka effektivnykh vibropogloshchayushchikh kompozitsionnykh polimernykh materialov i pokrytiy mashinostroitel'nogo naznacheniya [Research of viscoelastic and adhesion-strength property and development of effective vibration absorbing composite polymeric materials and coatings of mechanical engineering purpose] // *Plasticheskiye massy. Plasticheskie Massy*. 2020. No. 7–8. P. 32–36. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-7-8-32-36. EDN: MEIYAF. (In Russ.).

11. Sayfullayeva G. I., Negmatov S. S., Abed N. S., Kamalova D. I. Issledovaniye elektroprovodyashchikh kompozitsionnykh termoreaktivnykh polimernykh materialov i pokrytiy na ikh osnove dlya tribotekhnicheskogo naznacheniya [Research of electrically conductive composite thermoreactive polymer materials and coatings on their basis for tribotechnical purpose] // *Universum: tekhnicheskiye nauki: elektron. nauch. zhurn. Univerzum: Technical sciences. Electronic Scientific Journal*. 2020. No. 12 (81). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11102> (accessed: 20.06.2024). (In Russ.).

12. Yerofeyev V. T., Smirnov I. V., Voronov P. V. [et al.]. Issledovaniye stoykosti polimernykh pokrytiy v usloviyakh vozdeystviya klimaticheskikh faktorov chernomorskogo poberezh'ya [The study of stability of polymeric coatings in terms of exposing climatic factors of the black sea coast] // *Fundamental'nyye issledovaniya. Fundamental Research*. 2016. No. 11–5. P. 911–924. EDN: XSDHHB. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41277> (accessed: 20.06.2024). (In Russ.).

13. Ikromov N. A., Rasulov D. N. Ob'yekty i metodiki issledovaniya kompozitsionnykh polimernykh materialov [Objects and methods of research of composite polymer materials] // *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii. Modern Scientific Researches and Innovations*. 2020. No. 10 (114). EDN: TMYHPK. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2020/10/93640> (accessed: 20.06.2024). (In Russ.).

14. Zinoviev V. E. Analysis of factor affecting the strength of fixed bonds assembled using metal-polymer compositions // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 900 (1). P. 012009. DOI: 10.1088/1757-899X/900/1/012009. EDN: TLACUN. (In Engl.).

15. Cibulka I., Hnedkovsky L., Takagi T. P- ρ -T data of liquids: summarization and evaluation. 4. Higher 1-alkanols (C11, C12, C14, C16), secondary, tertiary, and branched alkanols, cycloalkanoles, alkanediols, alkanetriols, ether alkanols, and aromatic hydroxy derivatives // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 1997. Vol. 42. P. 415–433. DOI: 10.1021/JE960389Z. (In Engl.).

16. Cibulka I., Takagi T. P- ρ -T data of liquids: summarization and evaluation. 5. Aromatic hydrocarbons // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 1999. Vol. 44. P. 411–429. DOI: 10.1021/je960199o. (In Engl.).

17. Cibulka I., Zikova M. Liquid densities at elevated pressures of 1-alkanols from C1 to C10: a critical evaluation of experimental data // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 1994. Vol. 39 (4). P. 876–886. DOI: 10.1021/je00016a055. (In Engl.).

18. Cibulka I., Hnedkovsky L. Liquid densities at elevated pressures of n-alkanes from C5 to C16: a critical evaluation of experimental data // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 1996. Vol. 41. P. 657–668. DOI: 10.1021/je960058m. (In Engl.).

19. Shapovalov V. V., Kolesnikov V. I., Kharlamov P. V. [et al.]. Improving the efficiency of the path — rolling stock system based on the implementation of anisotropic frictional bonds // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 900 (1). P. 012011. DOI: 10.1088/1757-899X/900/1/012011. EDN: KJDDLf. (In Engl.).

20. Cibulka I., Hnedkovsky L., Takagi T. P- ρ -T data of liquids: summarization and evaluation. 3. Ethers, ketones, aldehydes, carboxylic acids, and esters // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 1997. Vol. 42. P. 2–26. DOI: 10.1021/je960199o. (In Engl.).

21. Kirishchiyeva V. I., Mukutadze M. A. Issledovaniye iznosostoykosti radial'nogo podshipnika s polimernym pokrytiyem, rabotayushchego na mikropolyarnom smazochnom materiale [Investigation of wear resistance of polymer-coated radial bearing running on micropolar lubricant] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2022. No. 4 (184). P. 41–45. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-184-41-45. EDN: DXLWGM. (In Russ.).

22. Mukutadze M. A., Abdulrahman Kh. N., Shvedova V. E. [et al.]. Issledovaniya na iznosostoykost' konstruktssii radial'nogo podshipnika s uchetom reologicheskikh svoystv mikropolyarnogo smazochnogo materiala [Studies on wear resistance of the radial bearing design taking into account rheological properties of micropolar lubricant] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 3 (187). P. 5–14. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-5-14. EDN: IKFMSX. (In Russ.).

MUKUTADZE Murman Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Higher Mathematics Department, Rostov State Transport University (RSTU), Rostov-on-Don.
SPIN-code: 9636-3223

AuthorID (RSCI): 389305

ORCID: 0000-0003-2910-3047

AuthorID (SCOPUS): 55049709500

ResearcherID: AAI-2420-2021

Correspondence address: murman1963@yandex.ru

KHARLAMOV Pavel Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Transport Vehicles and Tribotechnics Department, RSTU, Rostov-on-Don.

ORCID: 0000-0001-5100-4894

AuthorID (SCOPUS): 57191516687

Correspondence address: pvarlamov@rgups.ru

PRIKHODKO Viktor Markovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Descriptive Geometry and Graphics Department, RSTU, Rostov-on-Don.

ORCID: 0000-0002-0907-9320

Correspondence address: v.m.prikhodko@yandex.ru

BOLGOVA Ekaterina Alexandrovna, Graduate Student of Higher Mathematics Department, RSTU, Rostov-on-Don.

ORCID: 0000-0002-0737-1846

Correspondence address: bolgova_katya6@mail.ru

SHVEDOVA Valentina Evgenievna, Graduate Student of Higher Mathematics Department, RSTU, Rostov-on-Don.

ORCID: 0000-0002-8469-7671

Correspondence address: shvedovavalya@yandex.ru

For citations

Mukutadze M. A., Kharlamov P. V., Prikhodko V. M., Bolgova E. A., Shvedova V. E. Evaluation of the wear resistance of the modified radial bearing design considering the compressibility and viscosity of the micropolar lubricant // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 4 (192). P. 5–13. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-5-13.

Received June 25, 2024.

© M. A. Mukutadze, P. V. Kharlamov, V. M. Prikhodko, E. A. Bolgova, V. E. Shvedova