

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.822.17 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_8

*Е. А. Болгова, М. А. Мукутадзе, И. А. Колобов***ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА С УЧЕТОМ СЖИМАЕМОСТИ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА**

Аннотация. Исследование включает разработку и анализ математической модели микрополярного смазочного материала в модифицированной конструкции подшипника скольжения с композиционным фторопластсодержащим покрытием на поверхности вала и канавкой, которая способствует улучшению распределения смазочного материала и повышению долговечности системы.

На основе уравнения движения, исследуемого жидкого смазочного материала, уравнения неразрывности и уравнения состояния получены новые математические модели, учитывающие дополнительно такой его параметр, как сжимаемость.

Новизна работы заключается в разработке методики инженерных расчетов конструкции радиального подшипника скольжения с полимерным покрытием при учете наличия в нем канавки, а также зависимости вязкости от давления и сжимаемости смазочного материала, позволяющих определить величину основных триботехнических параметров.

Результаты исследования обеспечили снижение погрешностей по несущей способности и по коэффициенту трения модифицированного подшипника в сравнении с традиционными конструкциями. В результате удалось добиться увеличения срока службы радиальных подшипников, что имеет большое значение для их промышленного применения.

Ключевые слова: радиальный подшипник, оценка износостойкости, антифрикционное полимерное покрытие, канавка, гидродинамический режим, верификация.

Для цитирования: Болгова, Е. А. Оценка износостойкости модифицированной конструкции радиального подшипника с учетом сжимаемости смазочного материала / Е. А. Болгова, М. А. Мукутадзе, И. А. Колобов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 8–19. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_8.

Введение

При разработке новых фторопластовых покрытий важная роль отводится процессу испытаний на износостойкость. Полифторированные углеводороды обладают отличной химической стабильностью и могут выдерживать воздействие агрессивных химических веществ, что делает их идеальным выбором для использования в агрессивных средах. Дополнительно проводятся анализы термостойкости покрытий, так как некоторые области их применения, например, авиа- и автомобилестроение [1], требуют устойчивости к высоким температурам.

Особое внимание уделяется изучению трибологических характеристик материалов покрытий, поскольку именно они оказывают непосредственное влияние на износостойкость и долговечность подшипников скольжения. Трибологические свойства определяются комплексом факторов, таких как трение, износ, адгезия и прочность покрытия. Проведение лабораторных испытаний позволяет выявить слабые места материалов и разработать рекомендации по улучшению их состава. Так, использование различных наполнителей, добавок и модификаторов [2] может значительно повысить эксплуатационные характеристики полимерных покрытий.

Методология оптимизации состава полимерных покрытий включает как экспериментальные, так и теоретические подходы. Экспериментальные методы базируются на тестировании различных композиций и параметров нанесения покрытий. В результате таких исследований выявляются закономерности и определяются оптимальные условия для получения высококачественных покрытий. Теоретические методы, в свою очередь, основаны на моделировании и численных расчетах. Они позволяют предсказать поведение покрытий в различных эксплуатационных условиях и сократить количество дорогостоящих и порой длительных экспериментальных испытаний.

Разработка моделей, описывающих процессы взаимодействия в системе «материал покрытия – базовый материал подшипника», является неотъемлемой частью проводимых исследований [3–5]. Такие модели позволяют детализировать механизмы взаимодействия между покрытием и подшипником, что, в свою очередь, способствует выяснению причин износа и разрушения материалов. Решение этих задач требует применения междисциплинарных подходов, объединяющих знания в области материаловедения, механики и трибологии. Интеграция результатов экспериментальных исследований и численных моделей способствует созданию новых высокоэффективных решений для применения в промышленности.

Так, авторы работ [6–8] сосредоточились на изучении оценки износостойкости по коэффициенту трения и нагрузочной способности трибоузлов с полимерными покрытиями и влияния эксплуатационных факторов: температуры, давления и скорости скольжения. При этом особое внимание уделено ими анализу изменений коэффициента трения при варьировании температурных режимов работы трибоузлов. Экспериментально было установлено, что повышение температуры приводит к значительному изменению физических и механических свойств полимерных покрытий, что, в свою очередь, сказывается на их износостойкости и коэффициенте трения.

Давление – еще один важный эксплуатационный фактор, влияющий на работу трибоузлов с полимерными покрытиями. Исследования показали, что увеличение давления на контактную поверхность приводит к уменьшению толщины полимерного слоя, что может вызывать его преждевременный выход из строя. Оптимизация давления позволяет не только продлить срок эксплуатации покрытия, но и улучшить нагрузочную способность трибоузлов.

В исследованиях [9–14] подробно изучены механизмы образования смазочной пленки при гидродинамическом и граничном трении. Основное внимание уделено полиамидным и полиуретановым покрытиям, которые широко применяются в различных видах подшипников благодаря своим уникальным свойствам. Результаты показали, что правильный выбор и применение данных покрытий может значительно улучшить эксплуатационные характеристики подшипников, снижая коэффициент трения и износ и тем самым повышая стабильность работы механизмов.

Моделирование процессов в зоне трения представляет собой ключевое направление в поиске способов повышения износостойкости и долговечности механических систем. В рамках исследований, проведенных в работах [15–20], акцент делается на взаимодействии геометрии поверхности подшипника и эксплуатационных характеристик смазочных материалов. Параметрическая оптимизация является важным инструментом, позволяющим находить оптимальные соотношения между геометрическими параметрами, механическими свойствами и режимами нагружения.

Исходя из вышеописанного можно заключить, что использование антифрикционных полимерных композиционных покрытий предоставляет новые возможности для улучшения надежности и производительности промышленного оборудования.

Методика расчета

Целью настоящего исследования является оценка износостойкости модифицированного радиального подшипника на основе разработки комплекса математических моделей и экспериментальных исследований.

Для оценки износостойкости рассматривается модифицированный радиальный подшипник. Задача выполняется при соблюдении ряда допущений, а именно: течение установившееся и ламинарное, жидкость сжимаемая и обладает микрополярными свойствами.

Запишем уравнения контуров вала с полимерным покрытием C_1 , вала без покрытия (с канавкой) C_0 , подшипниковой втулки C_2 в полярной системе координат (рис. 1) $r'\theta$ с полюсом в центре вала:

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

где r_0 – радиус вала с полимерным покрытием, м; r_1 – радиус подшипниковой втулки, м; \tilde{h} – высота канавки, м; $H = \varepsilon \cos \theta - \frac{1}{2} \varepsilon^2 \sin^2 \theta + \dots$, $\varepsilon = \frac{e}{r_0}$, ε – относительный эксцентриситет; e – эксцентриситет.

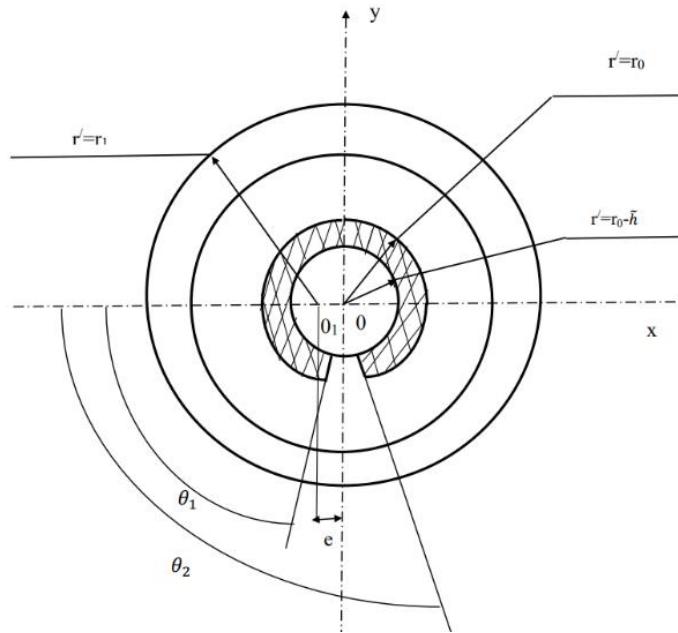


Рис. 1. Схема трибоконтакта

Микрополярная жидкость характеризуется тремя физическими константами μ' , κ' , γ' в отличие от ньютоновской жидкости, у которой лишь одна константа μ_0 .

Приведем выражения для вязкостных характеристик микрополярной жидкости:

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

где μ' – коэффициент динамической вязкости смазочного материала (параметр имеет размерность вязкости, поскольку он проявляется в результате учета микровращений, естественно, что его называют коэффициентом вязкости при вращательном движении), Нм/с^2 ; μ_0 – характерная вязкость ньютоновского смазочного материала, Нм/с^2 ; κ' , γ' – коэффициенты динамической вязкости микрополярного смазочного материала, Нм/с^2 ; κ_0 , γ_0 – характерная вязкость микрополярного смазочного материала, Нм/с^2 ; α' – экспериментальная постоянная величина; p' – гидродинамическое давление в смазочном слое, Па.

Для разработки расчетной модели с учетом (2) в качестве исходных используем ряд уравнений. Первым уравнением является уравнение, которое описывает движение жидкости. В дополнение к этому нам понадобятся уравнение неразрывности [21] и уравнение состояния:

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

где v_{θ_i} , $v'_{r'_i}$ – компоненты вектора скорости смазочной среды, м/с.

Поведение скорости жидкости на границах исследуемого объема опишем рядом зависимостей:

$$\begin{aligned} v_{\theta} &= 0, \quad v_{r'} = 0 \quad \text{при} \quad r' = r_1(1+H); \\ v_{r'} &= 0, \quad v_{\theta} = \Omega(r_0 - \tilde{h}) \quad \text{при} \quad r' = r_1 - \tilde{h}; \\ v'_{r'} &= 0, \quad v_{\theta} = \Omega r_0 \quad \text{при} \quad r' = r_0; \\ p(0) &= p(\theta) = p_g; \quad r_0 - \tilde{h} = h^* \quad \text{при} \quad \theta_1 < \theta < \theta_2, \end{aligned} \quad (4)$$

где θ_1 , θ_2 – соответственно угловые координаты канавки, градус.

Для удобства решения применяем стандартную методику перехода к безразмерным величинам:

$$\begin{aligned}
r' &= (r_0 - \tilde{h}) + \delta r, \quad \delta = r_1 - (r_0 - \tilde{h}), \quad v_r = \Omega \delta u, \quad v_\theta = \Omega v (r_0 - \tilde{h}), \\
p' &= p^* p, \quad p^* = \frac{(2\mu_0 + \kappa_0) \Omega (r_0 - \tilde{h})^2}{2\delta^2}; \\
v' &= v, \quad \mu' = \mu_0 \mu, \quad \kappa' = \kappa_0 \kappa, \quad \gamma' = \gamma_0 \gamma, \\
N^2 &= \frac{\kappa_0}{2\mu_0 + \kappa_0}, \quad N_1 = \frac{2\mu_0 l^2}{\delta^2 \kappa_0}, \quad l^2 = \frac{\gamma_0}{4\mu_0}. \quad \rho^* = \frac{2p_g}{\lambda \Omega^2 r_0^2}, \quad \rho' = \rho^* \rho.
\end{aligned} \tag{5}$$

Выполняя подстановку (5) в систему дифференциальных уравнений (3)–(4), получим:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + N^2 \frac{\partial v_i}{\partial r} &= \frac{1}{\Lambda} \cdot e^{-\alpha p} \frac{dp_i}{d\theta}, \quad \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} - \frac{v_i}{N_1} - \frac{1}{N_1} \cdot \frac{du_i}{dr} = 0, \\
\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial r} &= 0, \quad p = \rho.
\end{aligned} \tag{6}$$

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

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

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

$$p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p^*},$$

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

$$\eta = \frac{e}{\delta}; \quad \Lambda = \frac{r_0^2 \mu \Omega}{p_g \delta^2}; \quad p = \frac{\Lambda \Omega^2 r_0^2}{2} \rho,$$

где Λ – параметр сжимаемости; $\eta = \frac{l}{\delta}$ – конструктивный параметр; Q – расход смазочного материала в единицу времени, $\text{см}^3/\text{ч}$.

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

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + \frac{N_i^2}{2h} (2r - h) = \frac{1}{\Lambda} \cdot e^{-\alpha p} \frac{dp_i}{d\theta}, \quad v_i = \frac{1}{2h} (r^2 - rh), \quad \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial r} = 0, \quad p = \rho. \tag{7}$$

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

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + \frac{N_i^2}{2N_1 h} (2r - h) &= -\frac{1}{\alpha} \frac{dz_i}{d\theta}, \quad \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial r} = 0, \\
p = \rho, \quad v_i &= \frac{1}{2N_1 h} (r^2 - rh)
\end{aligned} \tag{8}$$

с соответствующими граничными условиями

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

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

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

$$z(0) = z(\theta_1) = z(\theta_2) = z(2\pi) = e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}, \quad Q = \text{const}. \tag{9}$$

Автомодельное решение (8) ищем по известному методу [22–23]:

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

Интегрируя (10), имеем:

– значения поля скоростей:

$$\begin{aligned}
\tilde{\Psi}'_i(\xi_i) &= a_1 \frac{\xi_i}{2} (\xi_i - 1), \quad \tilde{u}_i(\xi_i) = b_1 \frac{\xi_i^2}{2} - \frac{N^2}{2} \left(\frac{\xi_i^3}{3} - \frac{\xi_i^2}{2} \right) - \left(\frac{N^2}{12} + \frac{b_1}{2} + 1 \right) \xi_i, \\
\tilde{\Psi}'_2(\xi_2) &= a_2 \frac{\xi_2^2}{2} - a_2 \frac{\xi_2}{2}, \quad \tilde{u}_2(\xi_2) = b_2 \frac{\xi_2^2}{2} - \frac{N^2}{2} \left(\frac{\xi_2^3}{3} - \frac{\xi_2^2}{2} \right) - \left(\frac{N^2}{12} + \frac{b_2}{2} + 1 \right) \xi_2 + 1; \\
\tilde{\Psi}'_3(\xi_3) &= a_3 \frac{\xi_3^2}{2} - a_3 \frac{\xi_3}{2}, \quad \tilde{u}_3(\xi_3) = b_3 \frac{\xi_3^2}{2} - \frac{N^2}{2} \left(\frac{\xi_3^3}{3} - \frac{\xi_3^2}{2} \right) - \left(\frac{N^2}{12} + \frac{b_3}{2} + 1 \right) \xi_3 + 1; \tag{11}
\end{aligned}$$

– значения гидродинамического давления находим методом последовательных приближений, ограничиваясь при этом двумя приближениями:

$$\begin{aligned}
p_{11} &= \frac{p_g}{p^*}, \quad p_{21} = \frac{p_g}{p^*}, \quad p_{31} = \frac{p_g}{p^*}, \\
p_{12} &= 6\Lambda \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left((\theta - 2\eta \sin \theta) - \frac{2(1 - \eta^2)}{(2 + \eta^2)} (\theta - 3\eta \sin \theta) \right); \\
p_{22} &= \frac{6\Lambda(\theta - \theta_1)}{(1 + \tilde{h})^2} \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left[\frac{\theta_1^2}{4\pi^2} + \frac{\tilde{\eta}(\sin \theta - \sin \theta_1)}{\theta - \theta_1} \times \right. \\
&\quad \left. \times \left(1 - \frac{3\theta_1^2}{4\pi^2} \right) + \frac{\tilde{\eta}}{2\pi} \sin \theta_1 \left(1 - \frac{5\theta_1}{2\pi} \right) \right]; \\
p_{32} &= 6\Lambda(\theta - \theta_2) \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left[\frac{\theta_2^2}{4\pi^2} + \frac{\eta}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2) \times \right. \\
&\quad \left. \times \left(1 - \frac{3\theta_2^2}{4\pi^2} \right) + \frac{\eta}{2\pi} \sin \theta_2 \left(1 - \frac{5\theta_2}{2\pi} \right) \right]. \tag{12}
\end{aligned}$$

Зная формулы для гидродинамического давления и скорости, мы можем получить аналитические уравнения для расчетов несущей способности и силы трения:

$$\begin{aligned}
R_x &= \frac{6\mu_0 r_0^3 \Omega}{2\delta^2} \left[\int_0^{\theta_1} \left(p_1 - \frac{p_g}{p^*} \right) \cos \theta d\theta + \right. \\
&+ \left. \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(p_2 - \frac{p_g}{p^*} \right) \cos \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} \left(p_3 - \frac{p_g}{p^*} \right) \cos \theta d\theta \right]. \\
R_y &= \frac{6\mu_0 \omega r_0^3}{2\delta^2} \left[\int_0^{\theta_1} \left(p_1 - \frac{p_g}{p^*} \right) \sin \theta d\theta + \right. \\
&+ \left. \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(p_2 - \frac{p_g}{p^*} \right) \sin \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} \left(p_3 - \frac{p_g}{p^*} \right) \sin \theta d\theta \right]. \\
L_{тр} &= \mu \left[\int_0^{\theta_1} \left(\frac{\tilde{\psi}_1''(\theta)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{v}_1'(\theta)}{h(\theta)} \right) d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(\frac{\tilde{\psi}_2''(\theta)}{(h(\theta) + \tilde{h})^2} + \right. \right. \\
&+ \left. \left. \frac{\tilde{v}_2'(\theta)}{(h(\theta) + \tilde{h})^3} \right) d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} \left(\frac{\tilde{\psi}_3''(\theta)}{h(\theta)} + \frac{\tilde{v}_3'(\theta)}{h(\theta)} \right) d\theta \right].
\end{aligned} \tag{13}$$

В табл. 1 представлены результаты численных проверок на основе предложенной теоретической модели. Для проверки точности и применимости модели в широком диапазоне сценариев были протестированы значения параметров сжимаемости $\Lambda = 0,1-0,9$, напряжения σ в диапазоне 4–20 МПа.

Таблица 1

Результаты теоретического исследования

№	σ , МПа	Параметр сжимаемости Λ				
		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

Экспериментальная часть

Экспериментальное исследование состояло из верификации разработанной расчетной модели радиального подшипника скольжения с оптимальным сечением маслоподдерживающей канавки и определения величины погрешности, а также из комплекса экспериментальных исследований подшипника с усовершенствованной конструкцией опорной поверхности подшипниковой втулки. Это несущая поверхность с антифрикционным полимерным композиционным покрытием, имеющим маслоподдерживающую канавку.

В процессе исследований покрытий нового типа была 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 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, в колодках предусмотрены отверстия для термопар.

Одним из наиболее важных элементов модернизации машины трения является блок установки частичного вкладыша (рис. 2).

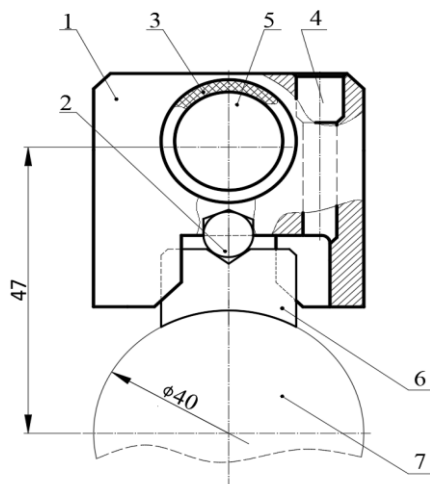


Рис. 2. Схема базирования и установки колодки [5M]:

1 – корпус колодкодержателя; 2 – опорный шарик; 3 – изолирующая втулка; 4 – канал для подачи жидкого смазочного материала; 5 – отверстие под вал каретки машины трения; 6 – колодка; 7 – ролик

Основные блоки экспериментальных исследований приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные блоки экспериментальных исследований

№ п/п	Блок	Цель	Выход	Переменные факторы	Диапазон варьирования	Оборудование	Погрешность, %
1	Конструкция опорной поверхности	Обеспечение автоперехода на режим жидкостного трения	Параметры канавок	Ширина канавки	4,0 мм	Машина трения модели ИИ 5018 (модернизированная)	± 10 %
			Смазочный материал	Тип смазочного материала	Микрополярный		
			Опорный профиль	Контактное давление, скорость	$\sigma = 4-20$ МПа $V = 0,3-1,0$ м/с		
2	Эксплуатационные характеристики подшипников	Верификация теоретических моделей	Коэффициент трения f	Параметры канавок	Ширина, глубина, $B = 1-5$		
			Несущая способность σ , МПа	Тип смазочного материала	Вязкий		
			Температура °С	Марка смазочного материала	Тп22-С + 5 % Cu		
		Определение трибопараметров	Коэффициент трения f	Нагрузочно-скоростные режимы	$\sigma = 4-20$ МПа $V = 0,3-1,0$ м/с		
		Вертикальная составляющая давления	Ширина канавки	4,0 мм			

Экспериментальные исследования проходили в два этапа. Первый этап предназначался для проверки теоретических моделей металлополимерного подшипника с оптимальным сечением маслоподдерживающей канавки при различных режимах эксплуатации, а также для определения погрешности, возникающей при расчетах по этим моделям. Второй этап представлял собой комплекс экспериментальных исследований металлополимерного подшипника, поверхность которого покрыта полимерным композицией, содержащим фторопласт, и имеет маслоподдерживающую канавку.

На подшипнике с маслосодержащей канавкой был выполнен ряд экспериментальных исследований. Эксперименты проводились в разных рабочих режимах (табл. 3), включая вариации скорости вращения, нагрузки и температурных условий.

Таблица 3

Сравнительный анализ результатов исследования

№ п/п	Режим		Теоретический результат	Экспериментальное исследование
	σ , МПа	V , м/с	Коэффициент трения	
1	4	0,3	0,0152	0,0169
2	8	0,3	0,0178	0,0187
3	12	0,3	0,0186	0,0190
4	16	0,3	0,0188	0,0193
5	20	0,3	0,0190	0,0197

С учетом поставленной задачи подтверждается общая стратегия проведения экспериментальных исследований в соответствии с классическими однофакторными и полнофакторными планами.

На основе полученных данных был проведен анализ, позволяющий оценить точность расчетной модели подшипника. Результаты экспериментов показали, что расчетная модель демонстрирует высокую точность предсказания поведения конструкции. Все выявленные отклонения находятся в допустимых пределах, что подтверждает надежность и работоспособность модели в различных рабочих условиях.

Полученные в результате теоретического исследования уточненные данные имеют большое значение для выбора подшипника в различных технических системах. Учет сжимаемости микрополярного жидкого смазочного материала при выполнении инженерных расчетов обеспечил снижение погрешности по несущей способности до 5–7 % и снижение погрешности до 6–8 % по коэффициенту трения. В дальнейших исследованиях представляется целесообразным изучить влияние на работу подшипников скольжения таких факторов, как температурные условия, динамические нагрузки и взаимодействие с различными смазочными материалами, что даст возможность продолжить совершенствование 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 может послужить значительному расширению возможностей практического использования расчетных моделей радиального подшипника скольжения и позволяет на практике оценивать его критически важные эксплуатационные характеристики.

2 Учет сжимаемости микрополярного жидкого смазочного материала, при выполнении инженерных расчетов обеспечил снижение погрешности по несущей способности до 5–7 % и снижение погрешности до 6–8 % по коэффициенту трения.

Список литературы

1 Хасьянова, Д. У. Повышение износостойкости радиального подшипника скольжения, смазываемого микрополярными смазочными материалами

References

1 Khasyanova, D. U. Increasing the wear resistance of a radial sliding bearing lubricated with micropolar

- 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 **Хасьянова, Д. У.** Исследование на износостойкость радиального подшипника с нестандартным опорным профилем с учетом зависимости вязкости от давления и температуры / Д. У. Хасьянова, М. А. Мукутадзе // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2023. – № 3. – С. 42–49. – DOI 10.52261/02346206-2023-3-42.
- 3 Исследование износостойкости подшипника скольжения с полимерным покрытием опорного кольца, имеющего канавку / В. В. Василенко, В. И. Киришичева, М. А. Мукутадзе, В. Е. Шведова // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2022. – Vol. 22, No. 4. – P. 365–372. – DOI 10.23947/2687-1653-2022-22-4-365-372.
- 4 Повышение износостойкости радиального подшипника с нестандартным опорным профилем и полимерным покрытием на поверхности вала с учетом зависимости вязкости от давления / Х. Н. Абдулрахман, В. И. Киришичева, М. А. Мукутадзе, В. Е. Шведова // Frontier Materials & Technologies. – 2022. – № 4. – С. 9–17. – DOI 10.18323/2782-4039-2022-4-9-17.
- 5 **Polyakov, R.** The method of long-life calculation for a rotor – hybrid bearing friction couple / R. Polyakov, L. Savin // 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.
- 6 Predictive analysis of rotor machines fluid-film bearings operability / R. Polyakov, S. Majorov, I. Kudryavcev, N. Krupenin // Vibroengineering Procedia : Vibration and Acoustics in Civil Engineering and Fault Diagnostics, Dubai, 2020. – Vol. 30 (3). – P. 61–67. – DOI 10.21595/vp.2020.21379.
- 7 Application of Artificial Neural Networks to Diagnostics of Fluid-Film Bearing Lubrication / E. P. Kornaeva, A. V. Kornaev, Yu. N. Kazakov, R. N. Polyakov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 734. – Article no. 012154. – DOI 10.1088/1757-899X/734/1/012154.
- 8 **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. – Article no. 032098. – DOI 10.1088/1757-899X/862/3/032098.
- 9 **Поляков, Р. Н.** Математическая модель бесконтактного пальчикового уплотнения с активным lubricants and metal coating melts / D. U. Khasyanova, M. A. Mukutadze // Problems of mechanical engineering and machine reliability. – 2022. – No. 4. – P. 46–53. – DOI 10.31857/S0235711922040101.
- 2 **Khasyanova, D. U.** A study on the wear resistance of a radial bearing with a non-standard support profile, taking into account the dependence of viscosity on pressure and temperature / D. U. Khasyanova, M. A. Mukutadze // Problems of mechanical engineering and automation. – 2023. – No. 3. – P. 42–49. – DOI 10.52261/02346206-2023-3-42.
- 3 Investigation of the wear resistance of a sliding bearing with a polymer coating of a support ring having a groove / V. V. Vasilenko, V. I. Kirishchieva, M. A. Mukutadze, V. E. Shvedova // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2022. – Vol. 22, No. 4. – P. 365–372. – DOI 10.23947/2687-1653-2022-22-4-365-372.
- 4 Increasing the wear resistance of a radial bearing with a non-standard support profile and a polymer coating on the shaft surface, taking into account the dependence of viscosity on pressure / Kh. N. Abdulrahman, V. I. Kirishchieva, M. A. Mukutadze, V. E. Shvedova // Frontier Materials & Technologies. – 2022. – No. 4. – P. 9–17. – DOI 10.18323/2782-4039-2022-4-9-17.
- 5 **Polyakov, R.** The method of long-life calculation for a rotor – hybrid bearing friction couple / R. Polyakov, L. Savin // 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.
- 6 Predictive analysis of rotor machines fluid-film bearings operability / R. Polyakov, S. Majorov, I. Kudryavcev, N. Krupenin // Vibroengineering Procedia : Vibration and Acoustics in Civil Engineering and Fault Diagnostics, Dubai, 2020. – Vol. 30 (3). – P. 61–67. – DOI 10.21595/vp.2020.21379.
- 7 Application of Artificial Neural Networks to Diagnostics of Fluid-Film Bearing Lubrication / E. P. Kornaeva, A. V. Kornaev, Yu. N. Kazakov, R. N. Polyakov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 734. – Article no. 012154. – DOI 10.1088/1757-899X/734/1/012154.
- 8 **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. – Article no. 032098. – DOI 10.1088/1757-899X/862/3/032098.
- 9 **Polyakov, R. N.** Mathematical model of contactless finger seal with active gap control / R. N. Polyakov,

- управлением зазором / Р. Н. Поляков, Л. А. Савин, А. В. Внук // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2018. – № 1 (327). – С. 66–71. – EDN XXRSCT.
- 10 Исследование вязкоупругих и адгезионно-прочностных свойств и разработка эффективных вибропоглощающих композиционных полимерных материалов и покрытий машиностроительного назначения / С. С. Негматов, Н. С. Абед, Р. Х. Саидакмедов [и др.] // *Пластические массы*. – 2020. – № 7–8. – С. 32–36. – DOI 10.35164/0554-2901-2020-7-8-32-36.
- 11 Исследование электропроводящих композиционных терморезистивных полимерных материалов и покрытий на их основе для триботехнического назначения / Г. И. Сайфуллаева, С. С. Негматов, Н. С. Абед, Д. И. Камалова // *Universum: технические науки. Электронный научный журнал*. – 2020. – № 12 (81). – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11102> (дата обращения: 20.08.2024).
- 12 Исследование стойкости полимерных покрытий в условиях воздействия климатических факторов черноморского побережья / В. Т. Ерофеев, И. В. Смирнов, П. В. Воронов [и др.] // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 11-5. – С. 911–924. – URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41277> (дата обращения: 20.08.2024).
- 13 **Икромов, Н. А.** Объекты и методики исследования композиционных полимерных материалов / Н. А. Икромов, Д. Н. Расулов // *Современные научные исследования и инновации*. – 2020. – № 10. – URL: <https://web.snauka.ru/issues/2020/10/93640> (дата обращения: 20.08.2024).
- 14 Analysis of factors affecting the strength of fixed bonds assembled using metal-polymer compositions / V. E. Zinoviev, P. V. Kharlamov, N. V. Zinoviev, R. A. Kornienko // *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 900. – Article no. 012009. – DOI 10.1088/1757-899X/900/1/012009.
- 15 **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. – DOI 10.46973/0201-727X-2021-1-122.
- 16 **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. – DOI 10.46973/0201-727X-2021-3-37.
- L. A. Savin, A.V. Vnukov // *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. – 2018. – № 1 (327). – P. 66–71. – EDN XXRSCT.
- 10 Research of viscoelastic and adhesive strength properties and development of effective vibration-absorbing composite polymer materials and coatings for mechanical engineering purposes / S. S. Negmatov, N. S. Abed, R. H. Saidakhmedov [et al.] // *Plastic masses*. – 2020. – No. 7–8. – P. 32–36. – DOI 10.35164/0554-2901-2020-7-8-32-36.
- 11 Research of electrically conductive composite thermosetting polymer materials and coatings based on them for tribotechnical purposes / G. I. Saifulayeva, S. S. Negmatov, N. S. Abed, D. I. Kamalova // *Universum: Technical Sciences. Electronic scientific journal*. – 2020. – No. 12 (81). – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11102> (date of access: 08/20/2024).
- 12 Investigation of the resistance of polymer coatings under the influence of climatic factors of the Black Sea coast / V. T. Erofeev, I. V. Smirnov, P. V. Voronov [et al.] // *Fundamental Research*. – 2016. – No. 11-5. – P. 911–924. – URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41277> (date of access: 08/20/2024).
- 13 **Ikromov, N. A.** Objects and methods of research of composite polymer materials / N. A. Ikromov, D. N. Rasulov // *Modern scientific research and innovations*. – 2020. – No. 10. – URL: <https://web.snauka.ru/issues/2020/10/93640> (date of access: 08/20/2024).
- 14 Analysis of factors affecting the strength of fixed bonds assembled using metal-polymer compositions / V. E. Zinoviev, P. V. Kharlamov, N. V. Zinoviev, R. A. Kornienko // *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 900. – Article no. 012009. – DOI 10.1088/1757-899X/900/1/012009.
- 15 **Kharlamov, P. V.** Monitoring changes in elastic-dissipative characteristics for solving problems of studying tribological processes in the railway track – rolling stock system / P. V. Kharlamov // *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*. – 2021. – No. 1. – P. 122–129. – DOI 10.46973/0201-727X-2021-1-122.
- 16 **Kharlamov, P. V.** 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 Putey Soobshcheniya*. – 2021. – No. 3. – P. 37–45. – DOI 10.46973/0201-727X-2021-3-37.

- 17 **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. – DOI 10.36652/0202-3350-2021-22-12-556-560.
- 18 Применение антифрикционных полимерных композиционных полимерных покрытий в тормозной рычажной передаче локомотивов / П. Г. Иваночкин, И. В. Больших, Т. З. Талахадзе, Е. П. Больших // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 1 (85). – С. 16–22. DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_16.
- 19 Study on the effect of the sealers on the steel surface layer modified by electrical discharge machining / P. G. Ivanochkin [et al.] // Solid State Phenomena. – 2021. – Vol. 316. – P. 713–719.
- 20 Modeling the mechanical characteristics of tribotechnical composites / T. V. Suvorova, O. A. Belyak, P. G. Ivanochkin, S. A. Danilchenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. XV International Scientific-Technical Conference. – 2019. – Article no. 012018.
- 21 Повышение износостойкости радиального подшипника с нестандартным опорным профилем и полимерным покрытием / В. И. Киришчиева, И. А. Колобов, М. А. Мукутадзе, В. Е. Шведова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3 (87). – С. 18–25. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_3_18.
- 22 **Киришчиева, В. И.** Исследование износостойкости радиального подшипника с полимерным покрытием, работающего на микрополярном смазочном материале / В. И. Киришчиева, М. А. Мукутадзе // Омский научный вестник. – 2022. – № 4 (184). – С. 41–45. – DOI 10.25206/1813-8225-2022-184-41-45.
- 23 Исследования на износостойкость конструкции радиального подшипника с учетом реологических свойств микрополярного смазочного материала / М. А. Мукутадзе, Х. Н. Абдулрахман, В. Е. Шведова [и др.] // Омский научный вестник. – 2023. – № 3 (187). – С. 5–14. – DOI 10.25206/1813-8225-2023-187-5-14.
- 17 **Kharlamov, P. V.** Investigation of the formation of secondary structures of friction transfer on the surface of steel samples during the implementation of metal plating technology / P. V. Kharlamov // Assembly in mechanical engineering, instrumentation. – 2021. – No. 12. – P. 556–560. – DOI 10.36652/02-3350-2021-22-12-556-560.
- 18 The use of antifriction polymer composite polymer coatings in the brake lever transmission of locomotives / P. G. Ivanochkin, I. V. Bolshykh, T. Z. Talakhadze, E. P. Bolshykh // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 1 (85). – P. 16–22. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_16.
- 19 Study on the effect of the sealers on the steel surface layer modified by electrical discharge machining / P. G. Ivanochkin [et al.] // Solid State Phenomena. – 2021. – Vol. 316. – P. 713–719.
- 20 Modeling the mechanical characteristics of tribotechnical composites / T. V. Suvorova, O. A. Belyak, P. G. Ivanochkin, S. A. Danilchenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. XV International Scientific-Technical Conference. – 2019. – Article no. 012018.
- 21 Improving the wear resistance of a radial bearing with a non-standard support profile and a polymer coating / V. I. Kirishchieva, I. A. Kolobov, M. A. Mukutadze, V. E. Shvedova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 3 (87). – P. 18–25. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_3_18.
- 22 **Kirishchieva, V. I.** The study of wear resistance of a radial bearing with a polymer coating operating on a micropolar lubricant / V. I. Kirishchieva, M. A. Mukutadze // Omsk Scientific Bulletin. – 2022. – No. 4 (184). – P. 41–45. – DOI 10.25206/1813-8225-2022-184-41-45.
- 23 Studies on the wear resistance of the radial bearing structure taking into account the rheological properties of a micropolar lubricant / M. A. Mukutadze, Kh. N. Abdulrahman, V. E. Shvedova [et al.] // Omsk Scientific Bulletin. – 2023. – No. 3 (187). – P. 5–14. – DOI 10.25206/1813-8225-2023-187-5-14.

E. A. Bolgova, M. A. Mukutadze, I. A. Kolobov

EVALUATION OF THE WEAR RESISTANCE OF A MODIFIED RADIAL BEARING DESIGN TAKING INTO ACCOUNT THE COMPRESSIBILITY OF THE LUBRICANT

Abstract. The research includes the development and analysis of a mathematical model of a micropolar lubricant in a modified sliding bearing design with a composite fluoroplastic coating on the shaft surface and a groove that improves the distribution of lubricant and increases the durability of the system.

Based on the equation of motion of the liquid lubricant under study, the continuity equation and the equation of state, new mathematical models are obtained that additionally take into account such parameter as compressibility.

The novelty of the work lies in the development of a methodology for engineering calculations of the design of a radial sliding bearing with a polymer coating, taking into account the presence of a groove, as well as the dependence of viscosity on pressure and compressibility of the lubricant, allowing to determine the value of the main tribotechnical parameters.

The results of the study provided a decrease in errors in bearing capacity and in the coefficient of friction of the bearing in comparison with traditional designs. As a result, it was possible to achieve an increase in the service life of radial bearings, which is of great importance for their industrial applications.

Keywords: radial bearing, wear resistance assessment, antifriction polymer coating, groove, hydrodynamic mode, verification.

For citation: Bolgova, E. A. Evaluation of the wear resistance of a modified radial bearing design taking into account the compressibility of the lubricant / E. A. Bolgova, M. A. Mukutadze, I. A. Kolobov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 4. – P. 8–19. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_8.

Информация об авторах

Болгова Екатерина Александровна

Ростовский государственный университет путей сообщения,
кафедра «Высшая математика»,
аспирант,
e-mail: bolgova_katya6@mail.ru

Мукутадзе Мурман Александрович

Ростовский государственный университет путей сообщения,
кафедра «Высшая математика»,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой,
e-mail: murman1963@yandex.ru

Колобов Игорь Анатольевич

Ростовский государственный университет путей сообщения,
кафедра «Управление эксплуатационной работой»,
кандидат технических наук, доцент, декан факультета «Управление процессами перевозок»,
e-mail: Kolobowi@gmail.com

Information about the authors

Bolgova Ekaterina Alexandrovna

Rostov State Transport University,
Chair «Higher Mathematics»,
Postgraduate Student,
e-mail: bolgova_katya6@mail.ru

Mukutadze Murman Aleksandrovich

Rostov State Transport University,
Chair «Higher Mathematics»,
Doctor of Engineering Sciences,
Professor,
Head of the Chair,
e-mail: murman1963@yandex.ru

Kolobov Igor Anatolievich

Rostov State Transport University,
Chair «Operational Work Management»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
Dean of the Faculty
«Transportation Process Management»,
e-mail: Kolobowi@gmail.com