

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

ECONOMIC STUDIES

DOI: 10.12731/2070-7568-2023-12-3-7-25

УДК 621.822.17.003



Научная статья |

Математические, статистические и инструментальные методы в экономике

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА МОДИФИЦИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ И ЕГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

А.В. Морозова, М.А. Мукутадзе

В современных тяжело нагруженных узлах трения для обеспечения высокой несущей способности и увеличения продолжительности гидродинамического режима, а, следовательно, экономического эффекта подшипников скольжения применяются различного вида антифрикционные покрытия на поверхности опорного профиля подшипниковой втулки.

В исследовании осуществляется разработка и развитие математических моделей радиального подшипника скольжения с антифрикционным полимерным покрытием опорной поверхности, содержащим канавку. Ключевую роль здесь играет методика аналитического прогнозирования, определяющего механизм трения и условия его перехода от граничного к жидкостному.

Целью исследования является разработка математической модели радиального подшипника скольжения с полимерным покрытием опорной поверхности подшипниковой втулки, содержащей осевую канавку, для прогнозирования экономического эффекта.

Задачей исследования является разработка новых математических моделей и проведение анализа движения смазочного материала в рабочем зазоре радиального подшипника скольжения с учетом конструктивных особенностей для прогнозирования экономического эффекта.

Отличием от существующих моделей трибосистем с антифрикционными покрытиями является наличие канавки, обеспечивающее стабильное всплывание вала на гидродинамическом клине и снижение износа при пуске и выбегах, следовательно, увеличение срока службы трибосистем.

С помощью уравнения движения смазочного материала и уравнения неразрывности получены новые математические модели, учитывающие конструктивные особенности поверхности подшипниковой втулки – полимерное покрытие, ширину канавки, реологические свойства применяемого смазочного материала. По результатам экспериментального исследования на машине трения ИИ 5018 на образцах в виде частичных вкладышей выполнен расчет экономической эффективности чистого дисконтированного дохода.

В результате исследования разработаны новые математические модели для инженерных расчетов, позволяющие прогнозировать эффективность, надежность и продолжительность гидродинамического режима смазывания, а также определить основные триботехнические параметры. Чистый дисконтированный доход по результатам теоретического и экспериментального исследования оценивается в размере 0,36 млн рублей в год.

Ключевые слова: чистый дисконтированный доход; антифрикционное полимерное покрытие; канавка; радиальный подшипник; математические модели; экономический эффект; ширина канавки

Для цитирования. Морозова А.В., Мукутадзе М.А. Разработка математической модели для анализа экономического эффекта модифицированной конструкции радиального подшипника скольжения и его прогнозирования // Наука Красноярья. 2023. Т. 12, №3. С. 7-25. DOI: 10.12731/2070-7568-2023-12-3-7-25

Original article |

Mathematical, Statistical and Instrumental Methods in Economics

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR ANALYZING THE ECONOMIC EFFECT OF THE MODIFIED DESIGN OF A RADIAL SLIDING BEARING AND ITS PREDICTION

A.V. Morozova, M.A. Mukutadze

In modern heavy-loaded friction units, various types of antifriction coatings are used on the surface of the bearing profile of the bearing sleeve to ensure high

load-bearing capacity and increase the duration of the hydrodynamic regime, and consequently, the economic effect of sliding bearings.

In the study, the creation and development of mathematical models of a radial sliding bearing with an antifriction polymer coating of the support surface containing a groove is carried out. The key role here is played by the method of analytical forecasting, which determines the mechanism of friction and the conditions for its transition from boundary to liquid.

*The **aim of the study** is to develop a mathematical model of a radial sliding bearing with a polymer coating of the bearing sleeve bearing surface containing an axial groove to predict the economic effect.*

*The **objective of the study** is to develop new mathematical models and analyze the movement of lubricant in the working gap of a radial sliding bearing, taking into account design features to predict the economic effect.*

The difference from the existing models of tribosystems with antifriction coatings is the presence of a groove, which ensures stable ascent of the shaft on the hydrodynamic wedge and reduces wear during start-up and run-outs, hence increasing the service life of tribosystems.

Using the lubricant motion equation and the continuity equation, new mathematical models are obtained that take into account the design features of the bearing sleeve surface – polymer coating, groove width, rheological properties of the lubricant used. Based on the results of an experimental study on the AI 5018 friction machine, the economic efficiency of net discounted income was calculated on samples in the form of partial inserts.

*As a **result of the research**, new mathematical models for engineering calculations have been developed that allow predicting the efficiency, reliability and duration of the hydrodynamic lubrication regime, as well as determining the main tribotechnical parameters. Net discounted income based on the results of theoretical and experimental research is estimated at 0.36 million rubles per year.*

***Keywords:** net discounted income; antifriction polymer coating; groove; radial bearing; mathematical models; economic effect; groove width*

***For citation.** Morozova A.V., Mukutadze M.A. Development of a Mathematical Model for Analyzing the Economic Effect of the Modified Design of a Radial Sliding Bearing and Its Prediction. Krasnoyarsk Science, 2023, vol. 12, no. 3, pp. 7-25. DOI: 10.12731/2070-7568-2023-12-3-7-25*

Введение

Подшипники используются во всех отраслях промышленности и транспорта [1], и поэтому повышение эффективности их применения (включая внедрение инновационных моделей подшипников) имеет ключевое значение

для национальной экономики нашей страны. Особую актуальность данная задача приобретает в текущей геополитической ситуации [2], одним из следствий которой стал уход из России иностранных производителей касетных подшипников, ранее занимавших основную долю на российском рынке [3].

Современные экономические и технологические реалии таковы, что моделирование работы трибоузлов, а также дальнейшее прогнозирование их работы в условиях применения различных антифрикционных композиционных полимерных покрытий на рабочей поверхности являются первоочередными задачами обеспечения экономической эффективности и поддержания на должном уровне высокотехнологичной продукции, которая имеет длительный период эксплуатации. Следует заметить, что используемые покрытия содержат осевую канавку, с помощью которой происходит образование гидродинамического клина, также обязательно учитываются реологические свойства применяемых смазочных материалов.

Для предотвращения аварийного недостатка смазочного материала учеными предлагается: во-первых, применение различных видов покрытий; во-вторых, использование оригинальных конструкций, имеющих на поверхности покрытия из различных материалов. Проектирование подобных трибосистем требует специальных расчетов, основа которых – новые математические модели.

Основным для расчётов и дальнейшего проектирования является качество узлов трения, методология моделирования которых постоянно развивается и совершенствуется [4–7]. Также меняются в зависимости от условий работы и материалов (получение защитного антифрикционного покрытия на контактных поверхностях), параметры, оказывающие влияние на узлы трения [8–11]. Следовательно, возникает необходимость разработки новых методов для адекватного моделирования и экспериментальных исследований полученных математических моделей.

Результаты исследования [12–16] путём металлоплакирования в системе «железнодорожный путь – подвижной состав» показывают, что происходит уменьшение коэффициента трения. Доказано, что износ колес на прямых участках снижается и повышается тяговая мощность. При этом увеличение продольной деформации твердого тела составляет 60,6%.

Результаты исследований [17–24], посвященных испытаниям на износостойкость, а также установлению оптимального состава сплавов для покрытий рабочих поверхностей, обеспечивающих дополнительное смазывание с учетом их реологических свойств, демонстрируют рост несущей способности на 20 % и снижение коэффициента трения на 13–15%.

В работах [25–29] проведено исследование трибосистем (подшипников конечной и бесконечной длины) с пористыми конструктивными элементами. В результате исследований установлено, что гидродинамический режим увеличивается на 9–11%.

Возникает необходимость разработки новых моделей с учётом дополнительных факторов или повышения точности имеющихся моделей, а также использования этих моделей для экономического обоснования целесообразности внедрения новых видов подшипников [30, 31].

Цель исследования

Оценка экономического эффекта использования модифицированной конструкции подшипника скольжения на основе ее математической модели, учитывающей канавку на поверхности подшипниковой втулки, обеспечивающую всплытие вала на гидродинамическом клине.

Материалы и методы

В статье исследуется радиальный подшипник с полимерным покрытием, содержащим канавку. Скорость вращения цапфы равна Ω , скорость подшипниковой втулки равна 0.

Зависимость реологических свойств от давления:

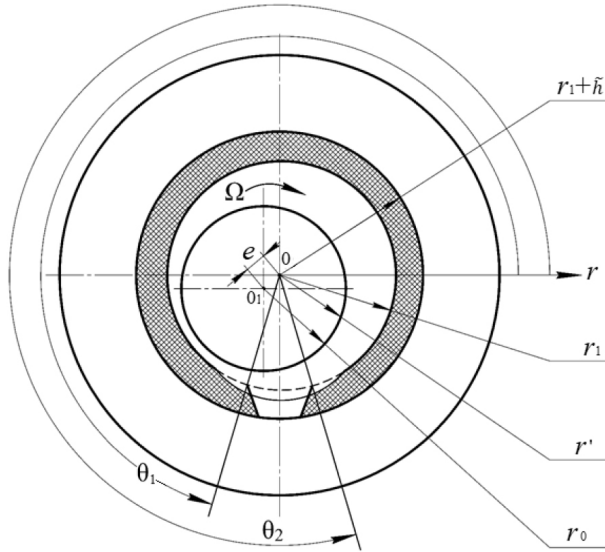
$$\mu' = \mu_0 e^{a p'} \tag{1}$$

Движение смазочного материала описывается безразмерным уравнением течения вязкой несжимаемой жидкости в приближении для «тонкого слоя», а также уравнением неразрывности с общепринятыми граничными условиями:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_i}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} = e^{-a p} \frac{d p_i}{d \theta}; \quad \frac{\partial u_i}{\partial r} + \frac{\partial v_i}{\partial \theta} = 0; \\ v = 1, \quad u = -\eta \sin \theta \quad \text{при} \quad r = 1 - \eta \cos \theta = h(\theta); \\ v = 0, \quad u = 0 \quad \text{при} \quad r = 0; \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2; \\ v = v^*(\theta), \quad u = u^*(\theta) \quad \text{при} \quad r = \eta_2; \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1; \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi; \\ p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{P_g}{P^*}, \\ Q = \text{const}, \quad p_3(\theta_2) = p_2(\theta_2); \quad p_1(\theta_1) = p_2(\theta_1). \\ v^*(\theta) = \frac{1}{h(\theta) - \eta_2}; \quad u^*(\theta) = \frac{\eta \sin \theta}{h(\theta) - \eta_2}. \end{aligned} \tag{2}$$

На рисунке изображена полярная система координат. Полюс находится в центре подшипниковой втулки. Уравнение контуров: вала; втулки и втулки с полимерным покрытием задано в виде:

$$r' = r_0(1 + H), \quad r' = r_1, \quad r' = r_1 - \tilde{h}, \quad (3)$$



Расчетная схема трибоконтакта
Tribocontact design scheme

Используя известный метод [32–33] автомодельного решения, в результате для гидродинамического давления и поля скоростей получим:

$$\tilde{\Psi}'_1(\xi_1) = a_1 \frac{\xi_1^2}{2} - a_1 \frac{\xi_1}{2}, \quad \tilde{v}_1(\xi_1) = b_1 \frac{\xi_1^2}{2} + \left(1 - \frac{b_1}{2}\right) \xi_1 + 1, \quad u_1(\xi_1) = \int_0^{\xi_1} \xi_1 \tilde{v}'_1(\xi_1) d\xi_1;$$

$$p_1 = \frac{p_g}{p^*} + \frac{6}{(1 - \eta_2)^2} \left(\theta + 2\tilde{\eta} \sin \theta - 2 \frac{\sqrt{1 - \tilde{\eta}^2}}{2 + \tilde{\eta}^2} (\theta + 3\tilde{\eta} \sin \theta) \right) \times \\ \times \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right);$$

$$\tilde{\Psi}'_2(\xi_2) = a_2 \frac{\xi_2^2}{2} - a_2 \frac{\xi_2}{2}, \quad \tilde{v}_2(\xi_2) = b_2 \frac{\xi_2^2}{2} + \left(1 - \frac{b_2}{2}\right) \xi_2 + 1, \quad u_2(\xi_2) = \int_0^{\xi_2} \xi_2 \tilde{v}'_2(\xi_2) d\xi_2;$$

$$p_2 = \frac{p_g}{p^*} + 6(\theta - \theta_1) \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left[1 + \frac{2\eta}{\theta - \theta_1} (\sin \theta - \sin \theta_1) - \right. \\ \left. - \left(1 - \frac{\eta}{\theta_1} \sin \theta_1 \right) \left(1 + \frac{3\eta}{\theta - \theta_1} (\sin \theta - \sin \theta_1) \right) \right];$$

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}'_3(\xi_3) &= a_3 \frac{\xi_3^2}{2} - a_3 \frac{\xi_3}{2}, \quad \tilde{v}_3(\xi_3) = b_3 \frac{\xi_3^2}{2} + \left(1 - \frac{b_3}{2}\right)\xi_3 + 1, \quad u_3(\xi_3) = \int_0^{\xi_3} \xi_3 \tilde{v}'_3(\xi_3) d\xi_3; \\ p_3 &= \frac{P_g}{p^*} + \frac{6(\theta - \theta_2)}{(1 - \eta_2)^2} \left(1 + \alpha \frac{P_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{P_g}{p^*}\right)^2\right) \left[1 + \frac{2\tilde{\eta}}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2) - \right. \\ &\quad \left. - \left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2\right) \left(1 + \frac{3\tilde{\eta}}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2)\right)\right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Используя (4) вычисляем значения несущей способности и силы трения:

$$\begin{aligned} R_x &= \frac{6\mu_0 \omega r_0^3}{\delta^2} \left(1 + \alpha \frac{P_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{P_g}{p^*}\right)^2\right) \left[\int_0^{\theta_1} p_1 \cos \theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} p_2 \cos \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} p_3 \cos \theta d\theta \right]; \\ R_y &= \frac{6\mu_0 \omega r_0^3}{\delta^2} \left(1 + \alpha \frac{P_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{P_g}{p^*}\right)^2\right) \left[\int_0^{\theta_1} p_1 \sin \theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} p_2 \sin \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} p_3 \sin \theta d\theta \right]; \\ L_{тр} &= \mu_0 \left(1 - \alpha p + \frac{\alpha^2 p^2}{2}\right) \left[\int_0^{\theta_1} \left(\frac{\tilde{\Psi}''_1(0)}{(h(0) - \eta_2)^2} + \frac{\tilde{v}'_1(0)}{h(0) - \eta_2} \right) d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(\frac{\tilde{\Psi}''_2(0)}{h^2(0)} + \frac{\tilde{v}'_2(0)}{h(0)} \right) d\theta + \right. \\ &\quad \left. + \int_{\theta_2}^{2\pi} \left(\frac{\tilde{\Psi}''_3(0)}{(h(0) - \eta_2)^2} + \frac{\tilde{v}'_3(0)}{h(0) - \eta_2} \right) d\theta \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Для численного анализа полученной модели использован следующий диапазон значений: $\theta_2 - \theta_1 = 2,86^\circ \dots 14,33^\circ$ (1–5 мм), $r = 20$ мм; $V = 1 \dots 3$ м/с; $\sigma = 5,8 - 29$ МПа; $\mu_0 = 0,0487 - 0,0379$ Нс/м².

В таблице 1 приведены результаты исследования коэффициента трения от диапазона численных значений осевой канавки при скорости $V = 1$ м/с.

Табл. 1.
Зависимость коэффициента трения от значений ширины канавки при $V = 1$ м/с
Table 1.
Dependence of the coefficient of friction on the values of the groove width at $V = 1$ m/s

| № п/п | $\theta_2 - \theta_1, ^\circ$ $\sigma, \text{ МПа}$ | 2,86 | 5,73 | 8,59 | 11,46 | 14,33 |
|-------|--|---------|----------|----------|----------|----------|
| | | 1 | 5,8 | 0,02878 | 0,02712 | 0,02672 |
| 2 | 11,6 | 0,0177 | 0,01629 | 0,007682 | 0,00573 | 0,00486 |
| 3 | 17,4 | 0,00991 | 0,000831 | 0,000921 | 0,000931 | 0,000912 |
| 4 | 23,2 | 0,00071 | 0,000731 | 0,000791 | 0,000832 | 0,000821 |
| 5 | 29 | 0,00052 | 0,000432 | 0,000492 | 0,000623 | 0,000631 |

Исследования изменения коэффициента трения для радиального подшипника: без антифрикционного покрытия (со стандартной опорной поверхностью), с полимерным антифрикционным покрытием без канавки и с антифрикционным полимерным покрытием опорной поверхности подшипниковой втулки, содержащим канавку шириной 3 мм, при скорости скольжения 1 м/с, $\sigma = 5,8\text{--}29$ МПа приведены в таблице 2.

Табл. 2.

Сопоставление величин коэффициентов трения рассмотренных моделей при ширине осевой канавки равной 0 или 3 мм (0 или 8,59 град)

Table 2.

Comparison of the values of the friction coefficients of the considered models with the width of the axial groove equal to 0 or 3 mm (0 or 8.59 degrees)

| № п/п | Режим | | Подшипник | | |
|----------|----------------|-----------|-------------|-------------|-------------------------------|
| | σ , МПа | V , м/с | стандартный | с покрытием | с покрытием с осевой канавкой |
| 1 | 5,8 | 1 | 0,0215 | 0,0190 | 0,0177 |
| 2 | 11,6 | 1 | 0,0158 | 0,0133 | 0,2018 |
| 3 | 17,4 | 1 | 0,0240 | 0,0115 | 0,00906 |
| 4 | 23,2 | 1 | 0,0255 | 0,0130 | 0,0106 |
| 5 | 29 | 1 | 0,0295 | 0,0170 | 0,01139 |

Результаты эксперимента

Для подтверждения разработанных моделей проведено на машине трения ИИ 5018 на образцах в виде частичных вкладышей экспериментальное исследование. Образцы имели некруговую рабочую поверхность. Глубина канавки равнялась 0,53–0,56 мм, а ширина – $\theta_2 - \theta_1 = 0^\circ\text{--}22,92^\circ$, и нагрузка 5,8...29 МПа, $V = 0,3\text{--}3$ м/с. В таблице 3 отражено исследование при скорости равной 1 м/с и ширине канавки – 8,59°.

Табл. 3.

Величины коэффициентов трения при ширине канавки 3 мм

Table 3.

Values of friction coefficients with a groove width of 3 mm

| № п/п | Режим | | Подшипник | | |
|----------|----------------|-----------|-----------------------------|-------------------------|---|
| | σ , МПа | V , м/с | со стандартной поверхностью | с покрытой поверхностью | с покрытой поверхностью, содержащей канавку |
| 1 | 5,8 | 1 | 0,0622 | 0,0211 | 0,020 |
| 2 | 11,6 | 1 | 0,0448 | 0,0268 | 0,0234 |
| 3 | 17,4 | 1 | 0,0351 | 0,0201 | 0,01901 |
| 4 | 23,2 | 1 | 0,0465 | 0,0245 | 0,0111 |
| 5 | 29 | 1 | 0,0496 | 0,0286 | 0,0184 |

Расчет экономической эффективности

Направлениями для использования результатов априорного и апостериорного исследований при расчете экономической эффективности могут быть:

1. Установление вида эффекта при применении результатов модели.
2. Выделение основополагающих показателей модели.
3. Вычисление реального изменения основополагающих показателей в не денежном выражении.
4. Получение результатов от использования модели.
5. Определение единовременных затрат.
6. Исследование реального экономического эффекта от использования модели.

Основополагающий показатель эффективности, полученной нами модели – это чистый дисконтированный доход (ЧДД). Для его расчёта мы должны посчитать аккумулированный дисконтированный эффект за время полезного использования усовершенствованного радиального подшипника. Ожидаемое значение ЧДД будет равно:

$$\text{ЧДД} = (P - 3) \alpha, \text{ руб.}, \quad (6)$$

где P – стоимостная оценка априорного и апостериорного исследований.

Приток денежных средств

$$P_{(t)} = \Pi_t \cdot B_t \cdot A_r, \text{ руб.} \quad (7)$$

При усовершенствовании подшипников, цены на которые не устанавливаются, приток денежных средств рассчитывается как

$$P_t = 3'_{m(t)} - 3_{m(t)}, \text{ руб.} \quad (8)$$

Величина ежегодных демпферных отчислений

$$\text{АО}_{\text{нтр}} = K_p \cdot 1/T, \text{ руб.} \quad (9)$$

Единовременные затраты (K) (связаны с использованием результатов модели) можно рассчитать по формуле:

$$K = \sum_{i=1}^T K_i. \quad (10)$$

Экономический эффект за год определяется по формуле

$$\text{Э}_r = P_r - 3_{mr} - \text{Н}_p - K/T, \text{ руб.} \quad (11)$$

Налог на прибыль Н_p рассчитывается как:

$$\text{Н}_p = (P_{(t)} - 3_{m(t)}) \cdot P, \text{ руб.} \quad (12)$$

Исходя из рассмотренных выше результатов исследования рассчитаем экономический эффект (таблицы 4 и 5).

Исходные данные

Табл. 4.

Initial data

Table 4.

| Показатели | До усовершенствования | После усовершенствования |
|---------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| Количество замен подшипников, шт. | 1210 | 840 |
| Стоимость замен подшипников, руб. | 910 | 988 |
| Количество закупаемых комплектов, шт. | | 52 |

Табл. 5.

Расчет экономической эффективности, млн руб.

Table 5.

Calculation of the economic efficiency, million rubles

| Операционная деятельность | |
|---|------|
| <i>Приток денежных средств</i> | |
| 1. Снижение текущих затрат | 0,44 |
| 2. Демпферные отчисления | 0,16 |
| 3. Всего притоки | 0,54 |
| 4. Имущественный налог | 0,04 |
| 5. Налог на прибыль | 0,21 |
| Инвестиционная деятельность | |
| <i>Отток денежных средств</i> | |
| 6. Затраты, связанные с использованием результатов разработок | 0,2 |
| 7. Всего оттоки | 0,28 |
| <i>Денежный поток</i> | |
| 8. Чистый доход | 0,36 |
| 9. ЧДД нарастающим итогом | 0,27 |
| 10. Коэффициент дисконтирования | 0,69 |
| 11. Индекс инфляции (приближенно) | 3 |
| 12. Чистый дисконтированный доход | 0,36 |

Вывод: ЧДД оценивается в размере 0,36 млн рублей в год.

Выводы

1. Исследуемая конструкция трибосистемы с полимерным покрытием, содержащей канавку шириной 3 мм, обеспечила всплытие вала на гидродинамическом клине, что подтверждается экспериментальными данными.

2. Полученные математические модели модифицированных трибосистем с учетом дополнительных факторов (ранее не учитываемых) значи-

тельно повышают их нагрузочную способность и снижают коэффициент трения, позволяющие прогнозировать продолжительность гидродинамического режима трения.

3. Чистый дисконтированный доход по результатам экспериментального исследования оценивается в размере 0,36 млн рублей в год.

Условные обозначения.

μ' – коэффициент динамической вязкости смазочного материала;

μ_0 – характерная вязкость;

α' – постоянная;

p' – гидродинамическое давление в смазочном слое;

$\eta = \frac{e}{\delta_z}$ – конструктивный параметр;

$\eta_2 = \frac{h}{\delta}$ – конструктивный параметр, характеризующий канавку;

θ_1 и θ_2 – соответственно угловые координаты канавки;

$u^*(\theta)$ и $v^*(\theta)$ – известные функции, обусловленные наличием полимерного покрытия на поверхности подшипниковой втулки;

p_g – давление на торцах интервала;

r_0 – радиус вала;

ε – относительный эксцентриситет;

r_1 – радиус подшипниковой втулки;

h – высота канавки.

Благодарности. Авторы выражают благодарность руководителю лаборатории кафедры «Теоретическая механика» академику Российской академии наук Колесникову Владимиру Ивановичу за помощь в проведении экспериментальных исследований.

Acknowledgments. The authors express their gratitude to the head of the laboratory of the Department of Theoretical Mechanics, Academician of the Russian Academy of Sciences Vladimir I. Kolesnikov for his assistance in conducting experimental research.

Список литературы

1. Аникеева-Науменко Л. О., Лебедева Е. В. Анализ эффективности использования инновационных грузовых вагонов в современных условиях // Транспортное дело России. 2017. № 5. С. 109-110.
2. Капп Т. О. Характеристика изготовления и потребления подшипниковой продукции // Актуальные проблемы и тенденции развития современной экономики: материалы Международной научно-практической конферен-

- ции, Самара, 18–19 ноября 2019 года. Часть 1. Самара: Самарский государственный технический университет, 2019. С. 268-274.
3. Плотников В. А. Структурные трансформации российской экономики под воздействием шоков и национальная экономическая безопасность // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. Серия: Экономика и управление. 2023. № 1(52). С. 15-25. <https://doi.org/10.18323/2221-5689-2023-1-15-25>
 4. 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: International Center for Numerical Methods in Engineering. 2017. P. 433–440.
 5. 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.
 6. Polyakov R., Majorov S., Kudryavcev I., Krupenin N. Predictive Analysis of Rotor Machines Fluid-Film Bearings Operability // Vibroengineering Procedia. 2020. Vol. 30. P. 61–67. <https://doi.org/10.21595/vp.2020.21379>
 7. Kornaeva E.P., Kornaev A.V., Kazakov Yu.N., Polyakov R.N. Application of Artificial Neural Networks to Diagnostics of Fluid-Film Bearing Lubrication // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 734. P. 012154. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/734/1/012154>
 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. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/862/3/032098>
 9. Zinoviev V.E., Kharlamov P.V., Zinoviev N.V., Kornienko R.A. Analysis of Factors Affecting the Strength of Fixed Bonds Assembled Using Metal-Polymer Compositions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 900. P. 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/900/1/012009/>
 10. Харламов П.В. Мониторинг изменений упруго-диссипативных характеристик для решения задач по исследованию трибологических процессов в системе «железнодорожный путь – подвижной состав» // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2021. № 1 (81). С. 122–129. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2021_1_122
 11. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Верченко А.В., Троицкий В.М. Формирование качества поверхностного слоя при абразивной обработке полимер-

- композитных материалов // *Advanced Engineering Research*. 2020. Т. 20, № 3. С. 235–242. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-235-242>
12. Харламов П.В. Применение физико-химического подхода для изучения механизма образования вторичных структур фрикционного переноса на поверхности контртела // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2021. № 3 (83). С. 37–45. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2021_3_37
 13. Харламов П.В. Исследование образования вторичных структур фрикционного переноса на поверхности стальных образцов при реализации технологии металлоплакирования // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2021. № 12. С. 556–560. <https://doi.org/10.36652/0202-3350-2021-22-12-556-560>
 14. Шаповалов В.В., Мигаль Ю.Ф., Озябкин А.Л. [и др.] Металлоплакирование рабочих поверхностей трения пары «колесо – рельс» // *Трение и износ*. 2020. Т. 41, № 4. С. 464–474. <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2020-41-4-464-474>
 15. Шаповалов В.В., Щербак П.Н., Богданов В.М. [и др.] Повышение эффективности фрикционной системы «колесо – рельс» // *Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта*. 2019. Т. 78, № 3. С. 177–182. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-3-177-182>
 16. 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. P. 012011. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/900/1/012011>
 17. Krishna U.G., Auradi V., Vasudeva B., Kori S.A. Processing and microstructural characterization of cermet-reinforced aluminium matrix composite by solidification process // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2018. Vol. 71(11). P. 2851–2854. <https://doi.org/10.1007/s12666-018-1432-7>
 18. Selvam P.T., Pugazhenth R., Dhanasekaran C., Chandrasekaran M., Sivaganesan S. Experimental investigation on the frictional wear behaviour of TiAlN coated brake pads // *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 37. P. 2419–2426. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.272>
 19. Lakshmikantha R.G., Auradi V. Processing and evaluation of Al/B4C particulate MMC's: tensile strength and wear properties under different elevated temperature test condition // *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 28. P. 504–509. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.209>
 20. Anbuhezhiyan G., Mohan B., Kathiresan S., Pugazhenth R. Influence of microstructure and mechanical properties of TiC reinforced magnesium nano composites // *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 27. P. 1530–1534. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.176>

21. Qian C., Li K., Guo X.Y., Liu B., Long Z.Y., Liu Y. Effect of WC grain size on mechanical properties and microstructures of alloy with medium entropy alloy Co- Ni-Fe binder // *Journal of Central South University*. 2020. Vol. 27. P. 1146–1157. <https://doi.org/10.1007/s11771-020-4355-5>
22. Nagara M., Auradi V., Kori S.A., Hiremath V. Investigations on mechanical and wear behaviour of nano Al₂O₃ particulates reinforced AA7475 alloy composites // *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2019. Vol. 13(1). P. 4623–4635. <https://doi.org/10.15282/jmes.13.1.2019.19.0389>
23. Atla S., Prasanna Lakshmi K. Investigation of graphite effect on the mechanical and tribological properties of al 7075-SiC-graphite hybrid metal matrix composites // *Tribologia: Finnish Journal of Tribology*. 2020. Vol. 37. P. 26–32. <https://doi.org/10.30678/ft.82667>
24. Rajeshkumar L., Saravanakumar A., Bhuvanewari V., Gokul G. Optimization of wear behaviour for AA2219-MoS₂ metal matrix composites in dry and lubricated condition // *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 27. P. 2645–2649. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.087>
25. Kolesnikov I.V., Mukutadze A. M., Avilov V.V. Ways of Increasing Wear Resistance and Damping Properties of Radial Bearings with Forced Lubricant Supply: ICIE 2018 // *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering*. 2019. P. 1049–1062. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_110
26. Мукутадзе М.А., Лагунова Е.О., Гармони́на А.Н., Василенко В.В. Радиальный подшипник скольжения с податливой опорной поверхностью // *Вестник машиностроения*. 2017. № 12. С. 33–38.
27. Гармони́на А.Н., Мукутадзе М.А., Приходько В.М. Расчетная модель радиального подшипника с двухслойным пористым покрытием на поверхности вала, работающего на электропроводящем смазочном материале // *Инженерный вестник Дона*. 2017. № 3 (46). С. 49.
28. Мукутадзе М.А., Гармони́на А.Н., Приходько В.М. Расчетная модель упорного подшипника с пористым покрытием на поверхности направляющей // *Вестник Донского государственного технического университета*. 2017. Т. 17, № 3 (90). С. 70–77. <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-3-70-77>
29. Мукутадзе М.А., Лагунова Е.О., Гармони́на А.Н., Солоп С.А., Василенко В.В. Гидродинамический расчет упорного подшипника с нежесткой опорной поверхностью // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2017. № 1(65). С. 128–137.
30. Айрапетова А. Г., Корелин В. В., Туриева А. С. Формирование принципов управления жизненным циклом инновационного проекта // *Промышленная политика в цифровой экономике: проблемы и перспективы: труды научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург*,

- 16–17 ноября 2017 года / под ред. А.В. Бабкина. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2017. С. 571-576. <https://doi.org/10.18720/IEP/2017.5/84>
31. Богатырева С. В., Титов А. Б., Куприянова М. Ю. Экономическая эффективность как основа формирования управленческих решений // Экономика и менеджмент систем управления. 2016. № 2-1(20). С. 116-122.
32. Хасьянова Д.У., Мукутадзе М.А. Повышение износостойкости радиального подшипника скольжения с металлическим покрытием // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2022. № 2. С. 41–46. <https://doi.org/10.31857/S023571192202006>
33. Хасьянова Д.У., Мукутадзе М.А. Повышение износостойкости радиального подшипника скольжения, смазываемого микрополярными смазочными материалами и расплавами металлического покрытия // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2022. № 4. С. 46–53. <https://doi.org/10.31857/S0235711922040101>

References

1. Anikeeva-Naumenko L. O., Lebedeva E. V. *Transportnoe delo Rossii*, 2017, no. 5, pp. 109-110.
2. Капп Т. О. *Aktual'nye problemy i tendentsii razvitiya sovremennoy ekonomiki: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Samara, 18–19 noyabrya 2019 goda. Chast' I* [Current problems and trends in the development of modern economics: materials of the International Scientific and Practical Conference, Samara, November 18–19, 2019. Part 1]. Samara: Samara State Technical University, 2019, pp. 268-274.
3. Plotnikov V. A. *Vektor nauki Tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika i upravlenie*, 2023, no. 1(52), pp. 15-25. <https://doi.org/10.18323/2221-5689-2023-1-15-25>
4. 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: International Center for Numerical Methods in Engineering, 2017, pp. 433–440.
5. Polyakov R.N., Savin L.A., Vnukov A.V. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*, 2018, no. 1 (327), pp. 66–71.
6. Polyakov R., Majorov S., Kudryavcev I., Krupenin N. Predictive Analysis of Rotor Machines Fluid-Film Bearings Operability. *Vibroengineering Procedia*, 2020, vol. 30, pp. 61–67. <https://doi.org/10.21595/vp.2020.21379>

7. Kornaeva E.P., Kornaev A.V., Kazakov Yu.N., Polyakov R.N. Application of Artificial Neural Networks to Diagnostics of Fluid-Film Bearing Lubrication. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 734, 012154. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/734/1/012154>
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, 032098. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/862/3/032098>
9. Zinoviev V.E., Kharlamov P.V., Zinoviev N.V., Kornienko R.A. Analysis of Factors Affecting the Strength of Fixed Bonds Assembled Using Metal-Polymer Compositions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 900, 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/900/1/012009/>
10. Kharlamov P.V. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*, 2021, no. 1 (81), pp. 122–129. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2021_1_122
11. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Verchenko A.V., Troitskiy V.M. *Advanced Engineering Research*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 235–242. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-235-242>
12. Kharlamov P.V. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*, 2021, no. 3 (83), pp. 37–45. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2021_3_37
13. Kharlamov P.V. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii*, 2021, no. 12, pp. 556–560. <https://doi.org/10.36652/0202-3350-2021-22-12-556-560>
14. Shapovalov V.V., Migal' Yu.F., Ozyabkin A.L. et al. *Trenie i iznos*, 2020, vol. 41, no. 4, pp. 464–474. <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2020-41-4-464-474>
15. Shapovalov V.V., Shcherbak P.N., Bogdanov V.M. et al. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta*, 2019, vol. 78, no. 3, pp. 177–182. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-3-177-182>
16. 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, 012011. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/900/1/012011>
17. Krishna U.G., Auradi V., Vasudeva B., Kori S.A. Processing and microstructural characterization of cermet-reinforced aluminium matrix composite by solidification process. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2018, vol. 71(11), pp. 2851–2854. <https://doi.org/10.1007/s12666-018-1432-7>
18. Selvam P.T., Pugazhenthir R., Dhanasekaran C., Chandrasekaran M., Sivaganesan S. Experimental investigation on the frictional wear behaviour of TiAlN

- coated brake pads. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 37, pp. 2419–2426. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.272>
19. Lakshmikantha R.G., Auradi V. Processing and evaluation of Al/B4C particulate MMC's: tensile strength and wear properties under different elevated temperature test condition. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 28, pp. 504–509. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.209>
 20. Anbuhezhiyan G., Mohan B., Kathiresan S., Pugazhenthir R. Influence of microstructure and mechanical properties of TiC reinforced magnesium nano composites. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 27, pp. 1530–1534. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.176>
 21. Qian C., Li K., Guo X.Y., Liu B., Long Z.Y., Liu Y. Effect of WC grain size on mechanical properties and microstructures of alloy with medium entropy alloy Co-Ni-Fe binder. *Journal of Central South University*, 2020, vol. 27, pp. 1146–1157. <https://doi.org/10.1007/s11771-020-4355-5>
 22. Nagaral M., Auradi V., Kori S.A., Hiremath V. Investigations on mechanical and wear behaviour of nano Al₂O₃ particulates reinforced AA7475 alloy composites. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 2019, vol. 13(1), pp. 4623–4635. <https://doi.org/10.15282/jmes.13.1.2019.19.0389>
 23. Atla S., Prasanna Lakshmi K. Investigation of graphite effect on the mechanical and tribological properties of Al 7075-SiC-graphite hybrid metal matrix composites. *Tribologia: Finnish Journal of Tribology*, 2020, vol. 37, pp. 26–32. <https://doi.org/10.30678/ft.82667>
 24. Rajeshkumar L., Saravanakumar A., Bhuvaneshwari V., Gokul G. Optimization of wear behaviour for AA2219-MoS₂ metal matrix composites in dry and lubricated condition. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 27, pp. 2645–2649. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.087>
 25. Kolesnikov I.V., Mukutadze A. M., Avilov V.V. Ways of Increasing Wear Resistance and Damping Properties of Radial Bearings with Forced Lubricant Supply: ICIE 2018. *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering*, 2019, pp. 1049–1062. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_110
 26. Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Garmonina A.N., Vasilenko V.V. *Vestnik mashinostroeniya*, 2017, no. 12, pp. 33–38.
 27. Garmonina A.N., Mukutadze M.A., Prikhod'ko V.M. *Inzhenernyy vestnik Dona*, 2017, no. 3 (46), p. 49.
 28. Mukutadze M.A., Garmonina A.N., Prikhod'ko V.M. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, vol. 17, no. 3 (90), pp. 70–77. <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-3-70-77>

29. Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Garmonina A.N., Solop S.A., *Vasilenko V.V. Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putyey soobshcheniya*, 2017, no. 1(65), pp. 128–137.
30. Ayrapetova A. G., Korelin V. V., Turieva A. S. *Promyshlennaya politika v tsifrovoy ekonomike: problemy i perspektivy: trudy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Sankt-Peterburg, 16–17 noyabrya 2017 goda* [Industrial policy in the digital economy: problems and prospects: proceedings of a scientific and practical conference with international participation, St. Petersburg, November 16–17, 2017] / ed. A.V. Babkina. St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2017, pp. 571–576. <https://doi.org/10.18720/IEP/2017.5/84>
31. Bogatyreva S. V., Titov A. B., Kupriyanova M. Yu. *Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya*, 2016, no. 2-1(20), pp. 116–122.
32. Khas'yanova D.U., Mukutadze M.A. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2022, no. 2, pp. 41–46. <https://doi.org/10.31857/S023571192202006>
33. Khas'yanova D.U., Mukutadze M.A. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2022, no. 4, pp. 46–53. <https://doi.org/10.31857/S0235711922040101>

ДАнные ОБ АВТОРАХ

Морозова Анна Викторовна, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры «Высшая математика»

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»

пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2, г.

Ростов-на-Дону, 344038, Российская Федерация

anuyta_morozova@mail.ru

Мукутадзе Мурман Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика»

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»

пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2, г.

Ростов-на-Дону, 344038, Российская Федерация

murman1963@yandex.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Anna V. Morozova, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics
Rostov State Transport University

*2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation
anyuta_morozova@mail.ru*

Murman A. Mukutadze, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Higher Mathematics
*Rostov State Transport University
2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation
murman1963@yandex.ru*

Поступила 04.07.2023

После рецензирования 26.07.2023

Принята 02.08.2023

Received 04.07.2023

Revised 26.07.2023

Accepted 02.08.2023