

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА, ИМЕЮЩЕГО НА НЕСТАНДАРТНОЙ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНОЕ ПОКРЫТИЕ С ОСЕВОЙ КАНАВКОЙ

*Киришчьева В.И.*

*Ростовский государственный университет путей сообщения,  
Ростов-на-Дону, Россия*

**Ключевые слова:** радиальный подшипник, повышение износостойкости, микрополярный смазочный материал, антифрикционное полимерное покрытие, осевая канавка, турбулентный режим.

**Аннотация.** Рассматривается работа подшипника в гидродинамическом режиме за счет нанесения на нестандартную адаптированную к условиям трения опорную поверхность подшипниковой втулки антифрикционного полимерного композиционного покрытия с осевой канавкой, обладающего микрополярными свойствами. Учитывается влияние давления и температуры при турбулентном режиме трения на реологические свойства смазочного материала. Приводятся результаты численного анализа теоретических моделей и экспериментальной оценки предлагаемой конструкции с целью верификации и подтверждения эффективности полученных моделей.

## INVESTIGATION OF INCREASING THE WEAR RESISTANCE OF A RADIAL BEARING HAVING A POLYMER COATING WITH AN AXIAL GROOVE ON A NON-STANDARD BEARING SURFACE

*Kirishchieva V.I.*

*Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia*

**Keywords:** radial bearing, increased wear resistance, micropolar lubricant, antifriction polymer coating, axial groove, turbulent mode.

**Abstract.** The operation of the bearing in the hydrodynamic mode is considered due to the application of an antifriction polymer composite coating with an axial groove having micropolar properties on a non-standard bearing surface adapted to friction conditions of the bearing sleeve. The influence of pressure and temperature in the turbulent friction mode on the rheological properties of the lubricant is taken into account. The results of numerical analysis of theoretical models and experimental evaluation of the proposed design are presented in order to verify and confirm the effectiveness of the obtained models.

**Введение.** Постоянный прогресс в области производства смазочных материалов приводит к усложнению разработки математических моделей с учетом тепловых процессов [1-10], геометрии опорного узла и совокупности всех действующих нагрузок.

Анализ работ [11-22], посвященных влиянию антифрикционных покрытий на тепловые процессы при учете ранее не принимавшихся в расчет факторов, а также [23-32] показывает необходимость совершенствования уже имеющихся расчетных моделей, т.е. учета дополнительных факторов и изменения конструкции опорной поверхности подшипниковой втулки для увеличения продолжительности гидродинамического режима.

**Постановка задачи.** Вал вращается с угловой скоростью  $\Omega$ , а подшипниковая втулка неподвижна. В принятом расположении полярной системы координат (рис. 1) уравнения контура вала, подшипниковой втулки под покрытием с некруговым профилем опорной поверхности и полимерного покрытия, копирующего некруговой опорный профиль втулки, запишем в виде

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

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

Полагаем, что вязкостные характеристики зависят от давления по закону:

$$\mu' = \mu_0 e^{\alpha' p' - \beta' T'}, \quad \kappa' = \kappa_0 e^{\alpha' p' - \beta' T'}, \quad \gamma' = \gamma_0 e^{\alpha' p' - \beta' T'}, \quad (2)$$

где  $\mu_0$  – характерная вязкость;  $\mu'$  – коэффициент динамической вязкости смазочного материала;  $p'$  – гидродинамическое давление в смазочном слое;  $\alpha'$ ,  $\beta'$  – постоянная экспериментальная величина;  $T'$  – температура

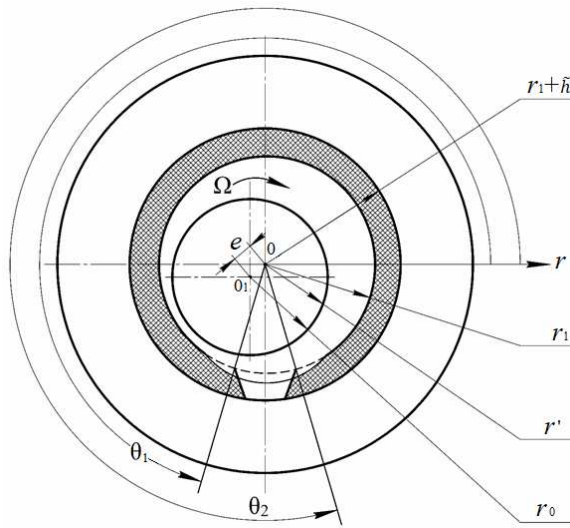


Рис. 1. Расчетная схема трибоконтакта

Исходными базовыми уравнениями с учетом (2) являются безразмерные уравнения – уравнение движения несжимаемой жидкости для «тонкого слоя» и уравнение неразрывности с соответствующими граничными условиями:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + \frac{N_i^2}{2N_1 h} (2r - h) = \frac{1}{j e^{-\alpha p - \beta T}} \frac{dp_i}{d\theta}, \quad v_i = \frac{1}{2N_1 h} (r^2 - rh), \quad \frac{\partial u_i}{\partial r} + \frac{\partial v_i}{\partial \theta} = 0. \quad (3)$$

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

$$v = 0, \quad u = 0, \quad v = 0 \text{ при } r = \eta_1 \sin \omega\theta, \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2;$$

$$v = v^*(\theta), \quad u = u^*(\theta), \quad v = 0 \text{ при } r = \eta_2 + \eta_1 \sin \omega\theta, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \text{ и } \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi;$$

$$p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = p_g / p^*, \quad (4)$$

где  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – соответственно угловые координаты канавки;  $\eta = e/\delta$  – конструктивный параметр;  $\eta_2 = \tilde{h}/\delta$  – конструктивный параметр, характеризующий канавку;  $u^*(\theta)$  и  $v^*(\theta)$  – известные функции, обусловленные наличием полимерного покрытия на поверхности подшипниковой втулки;  $p_g$  – давление на торцах интервала.

Автомодельное решение задачи находим по известному методу [33-34]. В результате для поля скоростей и давления получим:

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_i''' &= a_i; \quad \tilde{u}_i'' = b_i - \frac{N^2}{2N_1}(2\xi_i - 1); \quad \tilde{u}_i(\xi_i) + \xi_i \tilde{v}_i'(\xi_i) = 0; \\ \frac{dp_i}{d\theta} &= \frac{b_i}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{a_i}{(h(\theta) - \eta_2)^3}, \quad i = 1, 3; \\ \frac{dp_2}{d\theta} &= \frac{b_2}{h^2(\theta)} + \frac{a_2}{h^3(\theta)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Безразмерное гидродинамическое давление в смазочном слое определим из уравнения

$$\begin{aligned} \frac{1}{j\mu_i(\theta)} \frac{dp_i}{d\theta} &= \frac{b_i}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{a_i}{(h(\theta) - \eta_2)^3}, \quad i = 1, 3; \\ \frac{1}{j\mu_2(\theta)} \frac{dp_2}{d\theta} &= \frac{b_2}{h^2(\theta)} + \frac{a_2}{h^3(\theta)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Численный анализ полученных расчетных моделей проводили при скорости 1 м/с;  $\theta_2 - \theta_1 = 5,74 \dots 22,92$  град,  $\sigma = 5 \dots 25$  МПа,  $\mu_0 = 0,0707 \dots 0,0076 \frac{\text{Нс}}{\text{м}^2}$ ,  $\alpha = 0 \dots 1$ ,  $T = 25 \dots 100$  °С,  $\delta = 0,05 \cdot 10^{-3} \dots 0,7 \cdot 10^{-3}$  м,  $r_0 = 0,01995 \dots 0,04993$  м,  $P_g = 0,2$  МПа.

Проведенный численный анализ выражения, определяющего величину вертикальной составляющей давления, позволил построить график влияния на этот параметр принятых переменных факторов (рис. 2).

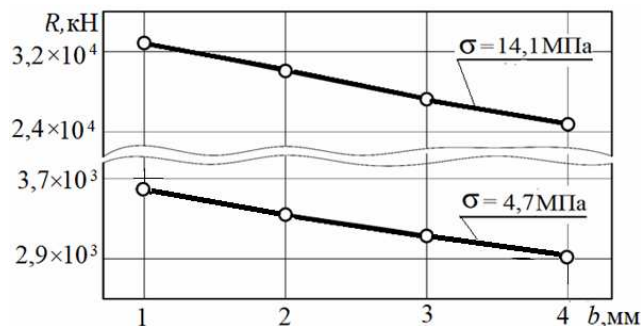


Рис. 2. Зависимость составляющей давления в подшипнике с адаптированным профилем и канавкой от ее ширины и рабочей нагрузки

Таким образом, подшипники с полимерным фторопластсодержащим антифрикционным покрытием при наличии маслоподдерживающей канавки способны работать как при граничном, так и при жидкостном трении.

### Проведение экспериментов

Экспериментальное исследование состоит из верификации разработанной расчетной модели с маслосодержащей канавкой, комплекса экспериментальных исследований с новой конструкцией опорной поверхности подшипниковой втулки с антифрикционным полимерным покрытием, имеющим канавку.

Триботехнические экспериментальные исследования радиальных подшипников проводились на модернизированной машине трения ИИ 5018 (рис. 3, 4).

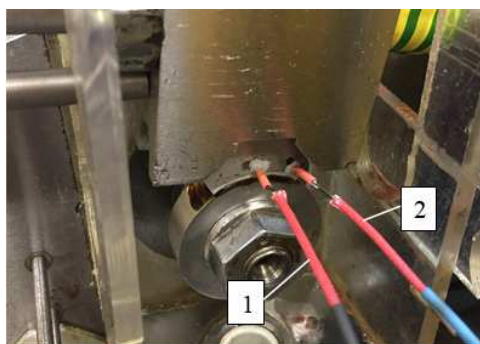


Рис. 3. Определение объемной температуры в паре трения «ролик – колодка»: 1, 2 – термопары

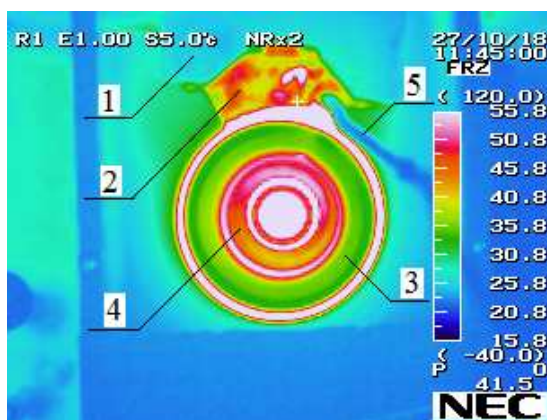


Рис. 4. Показания тепловизора при определении объемной температуры в паре трения «ролик – колодка» с фторопластсодержащим композиционным полимерным покрытием:  
1 – колодкодержатель; 2 – опытный образец; 3 – ролик; 4 – контргайка; 5 – термопара

Образцы были изготовлены в виде частичных вкладышей из кольцевой заготовки по центральному углу  $60^\circ$ . На их поверхность наносились полимерные покрытия и канавки на глубину покрытия равную 0,55 мм. Кроме того, колодки имели отверстия для термопар (рис. 3).

### Результаты исследования

В результате теоретического исследования установлено, что несущая способность повышается примерно на 8-9%, а коэффициент трения снижается на 6-8% в диапазоне исследованных режимов (табл. 1).

В процессе экспериментального исследования были установлены области рационального применения полученных моделей. Получен устойчивый гидродинамический режим трения после 2-минутной приработки, при этом нагрузка увеличивалась ступенчато 5 раз до 25 МПа (табл. 2).

Табл. 1. Результаты теоретического исследования поверхности подшипниковой втулки с фторопластсодержащим композиционным полимерным покрытием

№	$\sigma$ , МПа	Угловые координаты ( $\theta_2 - \theta_1$ )				
		5,74	10,03	14,32	18,61	22,92
Коэффициент трения						
1	5	0,007890	0,0101141	0,008105	0,0049011	0,00223011
2	10	0,004590	0,0044921	0,004663	0,0029860	0,00149661
3	15	0,001293	0,0012931	0,001216	0,0010715	0,00095711
4	20	0,001195	0,0011623	0,001114	0,0010146	0,00093798
5	25	0,000197	0,0010317	0,001014	0,0010580	0,00091897

Табл. 2. Результаты исследования поверхности подшипниковой втулки с фторопластсодержащим композиционным полимерным покрытием

№	Режим		Коэффициент трения				Погрешность, %	
	$\sigma$ , МПа	V, м/с	Теоретический результат		Экспериментальное исследование			
			Полимерное покрытие	Покрытие с канавкой	Покрытие	Покрытие с канавкой		
1	5	0,3	0,0117	0,0099	0,0141	0,0116	5-12	6-13
2	10		0,0062	0,0045	0,0076	0,0046		
3	15		0,0042	0,0023	0,0055	0,0035		
4	20		0,0057	0,0033	0,0079	0,0048		
5	25		0,0097	0,0066	0,0093	0,0081		

### Обсуждение результатов

Теоретическим исследованием установлено необходимое сечение канавки на поверхности подшипниковой втулки для выхода подшипника в режим гидродинамического смазывания при заданной нагрузке.

После этого разработана расчетная модель, описывающая течение микрополярного смазочного материала в рабочем зазоре. При разработке модели учтена зависимость вязкости смазочного материала от давления и температуры. Полученные результаты позволяют установить основные эксплуатационные характеристики.

### Список литературы

1. Ахвердиев К.С., Мукутадзе М.А., Вовк А.Ю., Семенко И.С. Гидродинамический расчет радиального подшипника, работающего в нестационарном режиме на вязкопластичной смазке, обладающей микрополярными свойствами // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2008. – № 4(32). – С. 131-138.
2. Ахвердиев К.С., Мукутадзе М.А., Лагунова Е.О., Солоп К.С. Расчетная модель радиального подшипника скольжения с повышенной несущей способностью, работающего на микрополярной смазке с учетом ее вязкостных характеристик от давления [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. Сетевое издание. –

2013. – № 4 (27). – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2200>.
3. Ахвердиев К.С., Лагунова Е.О., Мукутадзе М.А. Гидродинамический расчет радиального подшипника при наличии электромагнитного поля с учетом зависимости вязкости и электропроводности от температуры // Вестник Донского государственного технического университета. – 2009. – Т. 9, № 3(42). – С. 529-536.
  4. Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Garmonina A.N., Vasilenko V.V. Radial slip bearing with a pliable supporting surface // Russian Engineering Research. 2018, vol. 38, no. 3, pp. 166-171. doi.org/10.3103/S1068798X18030115.
  5. Akhverdiev K.S., Lagunova E.O., Mukutadze M.A. Calculated model of wedge-shaped sliding supports taking into account rheological properties of viscoelastic lubricant // Aviaengineering and transport (AVENT 2018). Proceedings of the International Conference. – Irkutsk, 2018, vol. 158, pp. 246-253. doi.org/10.2991/avent-18.2018.47.
  6. Akhverdiev K.S., Bolgova E.A., Mukutadze M.A., Vasilenko V.V. Mathematical model of a radial sliding bearing with a porous layer on its operating surface with a low-melting metal coating on shaft surface // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021, vol. 1064, p. 012005. doi.org/10.1088/1757-899X/1064/1/012005.
  7. Ахвердиев К.С., Александрова Е.В., Кручинина Е.Е., Мукутадзе М.А. Стратифицированное течение двухслойной смазки в зазоре упорного подшипника, обладающего повышенной несущей способностью // Вестник Донского государственного технического университета. – 2010. – Т. 10, № 2(45). – С. 217-223.
  8. Ахвердиев К.С., Мукутадзе М.А., Савенкова М.А., Вовк А.Ю. Математическая модель гидродинамической смазки бесконечно широких опор, работающих в нестационарном турбулентном режиме на микрополярной смазке // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2007. – №4(28). – С. 111-117.
  9. Хасьянова Д.У., Мукутадзе М.А. Оптимизация опорной поверхности подшипника скольжения по параметру несущей способности с учетом зависимости вязкости смазочного материала от давления и температуры // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2018. – № 4. – С. 66-72. – doi.org/10.31857/S023571190000592-2.
  10. Ахвердиев К.С., Александрова Е.Е., Мукутадзе М.А., Копотун Б.Е. Стратифицированное течение двухслойной смазки в зазоре радиального подшипника, обладающего повышенной несущей способностью и демпфирующими свойствами // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2009. – № 4 (36). – С. 133-139.
  11. Ахвердиев К.С., Александрова Е.Е., Мукутадзе М.А. Стратифицированное течение двухслойной смазки в зазоре сложнагруженного радиального подшипника конечной длины, обладающего повышенной несущей способностью // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2010. – № 1 (37). – С. 132-137.
  12. Мукутадзе М.А., Лагунова Е.О., Василенко В.В. Разработка расчетной модели гидродинамического смазочного материала, образующегося при плавлении подпятника, при наличии принудительной смазки // Проблемы машиностроения

- и надежности машин. – 2018. – № 3. – С. 76-83. – doi.org/10.7868/S0235711918030100.
13. Ахвердиев К.С., Мукутадзе М.А., Александрова Е.Е., Эркенов А.Ч. Математическая модель стратифицированного течения двухслойной смазочной композиции в радиальном подшипнике с повышенной несущей способностью с учетом теплообмена // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 1 (41). – С. 160-165.
  14. Ахвердиев К.С., Вовк А.Ю., Мукутадзе М.А., Савенкова М.А. Математическая модель гидродинамической смазки бесконечно широких опор, работающих в турбулентном режиме на микрополярной смазке // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – № 9. – С. 12-15.
  15. Василенко В.В., Лагунова Е.О., Мукутадзе М.А. Гидродинамический расчет радиального подшипника, смазываемого расплавом легкоплавкого покрытия при наличии смазочного материала [Электронный ресурс] // Интернет-журнал Науковедение. – 2017. – Т. 9, № 5. – Режим доступа: <https://naukovedenie.ru/PDF/20TVN517.pdf>.
  16. Мукутадзе М.А., Хасьянова Д.У. Радиальный подшипник скольжения в турбулентном режиме трения с легкоплавким покрытием // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2019. – № 5. – С. 48-58. – doi.org/10.1134/S0235711919050067.
  17. Ахвердиев К.С., Вовк А.Ю., Мукутадзе М.А., Савенкова М.А. Аналитический метод прогнозирования значений критериев микрополярной смазки, обеспечивающих устойчивый режим работы радиального подшипника скольжения // Трение и износ. – 2008. – Т. 29, № 2. – С. 184-191.
  18. Ахвердиев К.С., Мукутадзе М.А., Лагунова Е.О., Солоп К.С. Расчетная модель упорного подшипника скольжения с повышенной несущей способностью, работающего на неньютоновских смазочных материалах с адаптированной опорной поверхностью [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. Сетевое издание. – 2013. – № 4 (27). – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2201>.
  19. Мукутадзе М.А., Александрова Е.Е., Константинов А.А., Шевченко А.И. Гидродинамический расчет радиального пористого подшипника бесконечной длины с повышенной несущей способностью с учетом сил инерции // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 2(46). – С. 194-198.
  20. Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Solop K.S. Working out of an analytical model of an axial bearing taking into account dependence of viscous characteristics of micropolar lubrication on pressure and temperature // International Journal of Applied Engineering Research. 2017, vol. 12, no. 14, pp. 4644-4650.
  21. Ахвердиев К.С.О., Эркенов А.Ч., Александрова Е.Е., Мукутадзе М.А. Стратифицированное течение трехслойной смазки в зазоре упорного подшипника, обладающего повышенной несущей способностью // Трибология и надежность: сб. науч. тр. X Междунар. конф. – СПб.: ПГУПС, 2010. – С. 15-24.
  22. Ахвердиев К.С.О., Мукутадзе М.А., Семенко И.С. Гидродинамический расчет упорного подшипника скольжения, работающего на вязкоупругой смазке в турбулентном режиме трения // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2011. – № 4. – С. 69-77.

23. Кохановский В.А., Мукутадзе М.А. Матричные материалы антифрикционных композитов // Вестник Донского государственного технического университета. – 2001. – Т. 1. № 2. – С. 51-56.
24. Mukutadze M.A., Mukutadze A.M., Vasilenko V.V. Simulation model of thrust bearing with a free-melting and porous coating of guide and slide surfaces // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 560, p. 012031. doi.org/10.1088/1757-899X/560/1/012031.
25. Ахвердиев К.С.О., Мукутадзе М.А., Замшин В.А., Семенко И.С. Гидродинамический расчет радиального подшипника скольжения, работающего в турбулентном режиме трения при неполном заполнении зазора вязкоупругой смазкой // Вестник машиностроения. – 2009. – № 7. – С. 11-17.
26. Ахвердиев К.С., Мукутадзе М.А., Савенкова М.А., Вовк А.Ю. Математическая модель гидродинамической смазки радиального подшипника, работающего в нестационарном режиме на микрополярной смазке // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2008. – № 1 (29). – С. 147-151.
27. Ахвердиев К.С., Мукутадзе М.А., Колобов И.А., Гармони́на А.Н. Разработка расчетной модели радиального подшипника с учетом зависимости проницаемости, электропроводности и вязкости жидкого смазочного материала от давления [Электронный ресурс] // Интернет-журнал Науковедение. – 2016. – Т. 8, № 6 (37). – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/74TVN616.pdf>.
28. Лагунова Е.О., Мукутадзе М.А. Расчет радиального подшипника скольжения с легкоплавким покрытием // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, № 1. – С. 112-120.
29. Mukutadze M.A., Vasilenko V.V., Mukutadze A.M., Opatskikh A.N. Mathematical model of a plain bearer lubricated with molten metal // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. 2019, vol. 378, pp. 012021, doi.org/10.1088/1755-1315/378/1/012021.
30. 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.
31. Мукутадзе М.А., Флек Б.М., Задорожная Н.С., Поляков Е.В., Мукутадзе А.М. Расчетная модель гидродинамической смазки неоднородного пористого подшипника конечной длины, работающего в устойчивом нестационарном режиме трения при наличии принудительной подачи смазки [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. Сетевое издание. – 2013. – № 3 (26). – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1765>.
32. Ахвердиев К.С., Мукутадзе М.А., Лагунова Е.О., Василенко В.В. Клиновидные опоры скольжения, работающие на микрополярном смазочном материале, обусловленные расплавом // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 3 (67). – С. 8-15.
33. Мукутадзе М.А. Разработка системы расчетных моделей подшипников скольжения на основе развития гидродинамической и реодинамической теории смазки: Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: 05.02.04. – Ростов н/Д: РГУПС, 2015. – 38 с.
34. Ахвердиев К.С., Мукутадзе М.А., Лагунова Е.О., Василенко В.В. Гидродинамический расчет радиального подшипника, смазываемого расплавом легкоплавкого покрытия при наличии смазочного материала // Вестник



### References

1. Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Vovk A.Yu., Semenko I.S. Hydrodynamic calculation of a radial bearing operating in a non-stationary mode on a viscoplastic lubricant with micropolar properties // Bulletin of the Rostov State Transport University. 2008, no. 4 (32), pp. 131-138.
2. Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Solop K.S. Calculation model of a radial sliding bearing with increased bearing capacity operating on a micropolar lubricant taking into account its viscosity characteristics from pressure [Electronic resource] // Engineering Bulletin of the Don. Online publication. 2013, no. 4 (27). – Access mode: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2200>.
3. Akhverdiev K.S., Lagunova E.O., Mukutadze M.A. Hydrodynamic calculation of a radial bearing in the presence of an electromagnetic field taking into account the dependence of viscosity and electrical conductivity on temperature // Bulletin of the Don State Technical University. 2009, vol. 9, no. 3 (42), pp. 529-536.
4. Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Garmonina A.N., Vasilenko V.V. Radial slip bearing with a pliable supporting surface // Russian Engineering Research. 2018, vol. 38, no. 3, pp. 166-171. doi.org/10.3103/S1068798X18030115.
5. Akhverdiev K.S., Lagunova E.O., Mukutadze M.A. Calculated model of wedge-shaped sliding supports taking into account rheological properties of viscoelastic lubricant // Aviaengineering and transport (AVENT 2018). Proceedings of the International Conference. – Irkutsk, 2018, vol. 158, pp. 246-253. doi.org/10.2991/avent-18.2018.47.
6. Akhverdiev K.S., Bolgova E.A., Mukutadze M.A., Vasilenko V.V. Mathematical model of a radial sliding bearing with a porous layer on its operating surface with a low-melting metal coating on shaft surface // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021, vol. 1064, p. 012005. doi.org/10.1088/1757-899X/1064/1/012005.
7. Akhverdiev K.S., Alexandrova E.V., Kruchinina E.E., Mukutadze M.A. Stratified flow of two-layer lubricant in the gap of a thrust bearing with increased bearing capacity // Bulletin of the Don State Technical University. 2010, vol. 10, no. 2 (45), pp. 217-223.
8. Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Savenkova M.A., Vovk A.Yu. Mathematical model of hydrodynamic lubrication of infinitely wide supports operating in a nonstationary turbulent mode on micropolar lubrication // Bulletin of the Rostov State Transport University. 2007, no. 4 (28), pp. 111-117.
9. Khasyanova D.U., Mukutadze M.A. Optimization of the bearing surface of the sliding bearing according to the bearing capacity parameter, taking into account the dependence of the viscosity of the lubricant on pressure and temperature // Problems of mechanical engineering and machine reliability. 2018, no. 4, pp. 66-72. doi.org/10.31857/S023571190000592-2.
10. Akhverdiev K.S., Alexandrova E.E., Mukutadze M.A., Kopotun B.E. Stratified flow of a two-layer lubricant in the gap of a radial bearing with increased bearing capacity and damping properties // Bulletin of the Rostov State Transport University. 2009, no. 4(36), pp. 133-139.
11. Akhverdiev K.S., Alexandrova E.E., Mukutadze M.A. Stratified flow of two-layer lubricant in the gap of a complex-loaded radial bearing of finite length with increased

- bearing capacity // Bulletin of the Rostov State Transport University. 2010, no. 1 (37), pp. 132-137.
12. Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Vasilenko V.V. Development of a computational model of a hydrodynamic lubricant formed during the melting of a podpyatnik in the presence of forced lubrication // Problems of mechanical engineering and machine reliability. 2018, no. 3, pp. 76-83. doi.org/10.7868/S0235711918030100.
  13. Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Alexandrova E.E., Erkenov A.Ch. Mathematical model of stratified flow of a two-layer lubricant composition in a radial bearing with increased bearing capacity taking into account heat transfer // Bulletin of the Rostov State Transport University. 2011, no. 1 (41), pp. 160-165.
  14. Akhverdiev K.S., Vovk A.Yu., Mukutadze M.A., Savenkova M.A. Mathematical model of hydrodynamic lubrication of infinitely wide supports operating in turbulent mode on micropolar lubrication // Friction and lubrication in machines and mechanisms. 2007, no. 9, pp. 12-15.
  15. Vasilenko V.V., Lagunova E.O., Mukutadze M.A. Hydrodynamic calculation of a radial bearing lubricated by a melt of a fusible coating in the presence of a lubricant [Electronic resource] // Online journal of SCIENCE STUDIES. 2017, vol. 9, no. 5. – Access mode: <https://naukovedenie.ru/PDF/20TVN517.pdf>.
  16. Mukutadze M.A., Khasyanova D.U. Radial sliding bearing in turbulent friction mode with fusible coating // Problems of mechanical engineering and machine reliability. 2019, no. 5, pp. 48-58. doi.org/10.1134/S023571191905006.
  17. Akhverdiev K.S., Vovk A.Yu., Mukutadze M.A., Savenkova M.A. Analytical method prediction of the values of the criteria of micropolar lubrication, providing a stable mode of operation of the radial sliding bearing // Friction and wear. 2008, vol. 29, no. 2, pp. 184-191.
  18. Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Solop K.S. Calculation model of a thrust sliding bearing with increased bearing capacity operating on non-Newtonian lubricants with an adapted bearing surface [Electronic resource] // Engineering Bulletin of the Don. Online publication. 2013, no. 4(27). – Access mode: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2201>.
  19. Mukutadze M.A., Alexandrova E.E., Konstantinov A.A., Shevchenko A.I. Hydrodynamic calculation of a radial porous bearing of infinite length with increased bearing capacity taking into account inertia forces // Bulletin of the Rostov State Transport University. 2012, no. 2 (46), pp. 194-198.
  20. Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Solop K.S. Working out of an analytical model of an axial bearing taking into account dependence of viscous characteristics of micropolar lubrication on pressure and temperature // International Journal of Applied Engineering Research. 2017, vol. 12, no. 14, pp. 4644-4650.
  21. Akhverdiev K.S.O., Erkenov A.Ch., Alexandrova E.E., Mukutadze M.A. Stratified flow of three-layer lubrication in the gap of a thrust bearing with increased bearing capacity // Tribology and reliability: collection of scientific papers of the X International conference. – SPb.: PSTU, 2010. – P. 15-24.
  22. Akhverdiev K.S.O., Mukutadze M.A., Semenko I.S. Hydrodynamic calculation of a thrust sliding bearing operating on viscoelastic lubrication in a turbulent friction mode // Problems of mechanical engineering and machine reliability. 2011, no. 4, pp. 69-77.
  23. Kohanovsky V.A., Mukutadze M.A. Matrix materials of antifriction composites // Bulletin of the Don State Technical University. 2001, vol. 1, no. 2, pp. 51-56.

24. Mukutadze M.A., Mukutadze A.M., Vasilenko V.V. Simulation model of thrust bearing with a free-melting and porous coating of guide and slide surfaces // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 560, p. 012031. doi.org/10.1088/1757-899X/560/1/012031.
25. Akhverdiev K.S.O., Mukutadze M.A., Zamshin V.A., Semenko I.S. Hydrodynamic calculation of a radial sliding bearing operating in turbulent friction mode with incomplete filling of the gap with viscoelastic lubricant // Bulletin of Mechanical Engineering. 2009, no. 7, pp. 11-17.
26. Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Savenkova M.A., Vovk A.Yu. Mathematical model of hydrodynamic lubrication of a radial bearing operating in a non-stationary mode on micropolar lubrication // Bulletin of the Rostov State Transport University. 2008, no. 1 (29), pp. 147-151.
27. Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Kolobov I.A., Harmonina A.N. Development of a design model of a radial bearing taking into account the dependence of permeability, electrical conductivity and viscosity of a liquid lubricant on pressure [Electronic resource] // Online journal of SCIENCE STUDIES. 2016, vol. 8, no. 6 (37). – Access mode: <http://naukovedenie.ru/PDF/74TVN616.pdf> .
28. Lagunova E.O., Mukutadze M.A. Calculation of a radial sliding bearing with a fusible coating // Friction and wear. 2019, vol. 40, no. 1, pp. 112-120.
29. Mukutadze M.A., Vasilenko V.V., Mukutadze A.M., Opatskikh A.N. Mathematical model of a plain bearer lubricated with molten metal // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. 2019, vol. 378, pp. 012021, doi.org/10.1088/1755-1315/378/1/012021.
30. Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Harmonina A.N., Solop C.A., Vasilenko V.V. Hydrodynamic calculation of a thrust bearing with a non-rigid bearing surface // Bulletin of the Rostov State Transport University. 2017, no. 1 (65), pp. 128-137.
31. Mukutadze M.A., Fleck B.M., Zadorozhnaya N.S., Polyakov E.V., Mukutadze A.M. Computational model of hydrodynamic lubrication of a nonuniform porous bearing of finite length operating in a stable unsteady friction mode in the presence of forced lubrication [Electronic resource] // Engineering Bulletin of the Don. Online publication. 2013, no. 3(26). – Access mode: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1765>.
32. Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Vasilenko V.V. Wedge-shaped sliding supports operating on micropolar lubricant caused by melt // Bulletin of the Rostov State Transport University. 2017, no. 3 (67), pp. 8-15.
33. Mukutadze M.A. Development of a system of calculation models of sliding bearings based on the development of hydrodynamic and rheodynamic theory of lubrication: Abstract of the diss. ... doct. of tech. sc.: 05.02.04. – Rostov-on-Don: RSUPS, 2015. – 38 p.
34. Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Vasilenko V.V. Hydrodynamic calculation of a radial bearing lubricated by a melt of a fusible coating in the presence of a lubricant // Bulletin of the Rostov State Transport University. 2017, no. 2 (66), pp. 129-135.

<b>Киришцева Виктория Игоревна</b> – старший преподаватель	<b>Kirishchieva Victoria Igorevna</b> – senior lecturer
Milaya_vika@list.ru	

*Received 26.06.2023*