

КВАЗИСТАЦИОНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА В ЗАЗОРЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО УПОРНОГО ПОДШИПНИКА

Куманин С.В.

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

Ключевые слова: квазистационарное течение, экстремальный случай, металлическое покрытие, нестандартный опорный профиль, гидродинамический режим, устойчивость движения направляющей.

Аннотация. Рассматривается квазистационарное течение вязкой сжимаемой жидкости в зазоре упорного подшипника с нелинейным контуром опорной поверхности ползуна с помощью общеизвестных уравнений – движения сжимаемой жидкости, неразрывности, состояния и уравнения, описывающего профиль расплавленного контура опорного кольца. Рассмотрен случай для экстремальной и не экстремальной ситуации, т.е. когда параметр удельной теплоты плавления стремится к бесконечности и наоборот. В результате точного автомодельного решения определены основные эксплуатационные характеристики – поля скоростей и давления, нагрузочная способность и сила трения. Также решена задача об устойчивости движения опорного кольца.

QUASI-STATIONARY FLOW OF LUBRICANT IN THE GAP OF THE MODIFIED THRUST BEARING

Kumanin S.V.

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

Keywords: quasi-stationary flow, extreme case, metal coating, non-standard support profile, hydrodynamic regime, stability of the guide movement.

Abstract. The quasi-stationary flow of a viscous compressible fluid in the gap of a thrust bearing with a nonlinear contour of the support surface of the slider is considered using well-known equations – the motion of the compressible fluid, continuity, state and equation describing the profile of the molten contour of the support ring. The case is considered for extreme and non-extreme situations, i.e. when the parameter of the specific heat of melting tends to infinity and vice versa. As a result of an accurate self-similar solution, the main operational characteristics are determined - velocity and pressure fields, load capacity and friction force. The problem of the stability of the movement of the support ring is also solved.

Введение

Анализ работ [1-11], посвященных моделированию опор скольжения с металлическим покрытием, показал, что при расчетах не учитывается сжимаемость смазочного материала, т.е. при изменении давления плотность остается постоянной. Также для обеспечения гидродинамического режима смазывания возникает необходимость постоянного наличия смазочного материала [12-23]. Как известно, гидродинамический режим движения жидкости можно обеспечить посредством постоянной подачи жидкости, или применения пористого покрытия, металлического покрытия, или наличия нестандартной опорной поверхности [24-33]. В рассматриваемом в настоящей

статье случае для обеспечения гидродинамического режима движения жидкости нами приводится расчетная модель опоры скольжения с нестандартным опорным профилем и металлическим покрытием направляющей.

Материалы и методы исследования. Рассмотрено квазистационарное течение жидкости в зазоре опоры скольжения с металлическим покрытием направляющей и нестандартным опорным профилем ползуна. Скорость движения направляющей представим в виде $u^* + e'(t')$. Считаем, что в результате вязкого сдвига создаваемое тепло расплавляет поверхность направляющей (рис. 1).



Рис. 1. Расчетная схема

Для решения задачи используются общеизвестные безразмерные уравнения – уравнение движения сжимаемой вязкой жидкости, уравнение неразрывности, уравнение состояния и уравнение, описывающее расплавленный контур направляющей, и граничные условия:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{1}{\Lambda} \frac{dp}{dx}; \quad \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} = 0, \quad p = \rho, \quad \frac{dH(x)}{dx} = -K \int_{-H(x)}^{h(x)} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 dy; \quad (1)$$

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

$$u = 0, \quad v = -1 - e(t) \quad \text{при} \quad y = -H(x); \quad (2)$$

$$p(0) = p(1) = p_a; \quad H(x) = \frac{h_0^*}{h_0} \quad \text{при} \quad x = 0,$$

где $K = \frac{2\mu u^* h_0}{L'}$, $\Lambda = \frac{u^* \mu L}{p_a h_0^2}$, $\eta = \frac{L \operatorname{tg} \alpha}{h_0}$, $\eta_1 = \frac{a'}{h_0}$.

Решение рассматриваемой задачи вначале приведено для экстремального случая, при $L \rightarrow \infty$, $\Lambda \rightarrow \infty$, это соответствует случаю ползуна бесконечной длины.

Уравнение неразрывности проинтегрируем от $-\frac{h_0^*}{h_0}$ до h , получим:

$$p = 1 - \tilde{\eta}x + \tilde{\eta}_1 \sin x, \quad \tilde{\eta} = \frac{\eta}{1 + \frac{h_0^*}{h_0}}, \quad \tilde{\eta}_1 = \frac{\eta_1}{1 + \frac{h_0^*}{h_0}}$$

$$W = p^* L \left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{2} - \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega - 1) \right), \quad (3)$$

$$L_{\text{тр}} = \frac{p^* L (1 + e_1)}{h_0 \left(1 + \frac{h_0^*}{h_0} \right)} \left[1 - \frac{\tilde{\eta}}{2} - \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega - 1) \right].$$

По итогам численного анализа полученных зависимостей (3) можно утверждать, что для рассматриваемой опоры скольжения при $\omega = \pi$, $\frac{h_0^*}{h_0} \neq 0$ достигается наиболее рациональный по несущей способности и силе трения режим (рис. 2, 3).

Поскольку в рассматриваемом экстремальном случае основные рабочие характеристики не зависят от параметра сжимаемости, следовательно, устойчивый режим работы подшипника от параметра сжимаемости также не зависит.

Перейдем к рассмотрению более общего случая, когда $L' \neq \infty$, $\Lambda \neq \infty$.

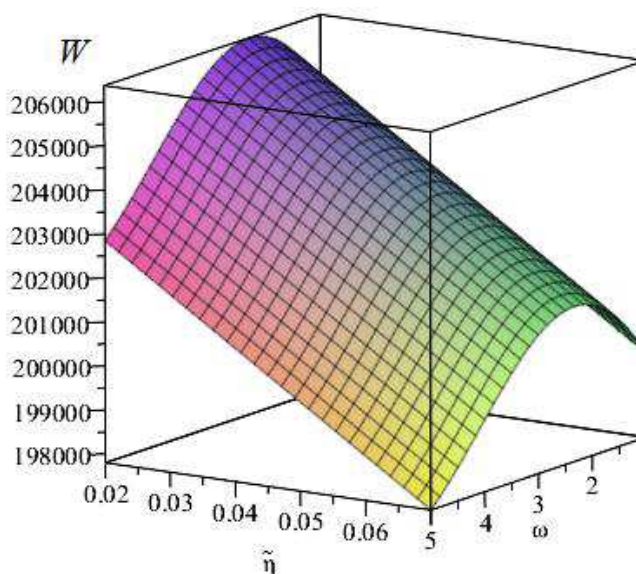


Рис. 2. Зависимость параметров $\tilde{\eta}$ и ω от нагрузочной способности

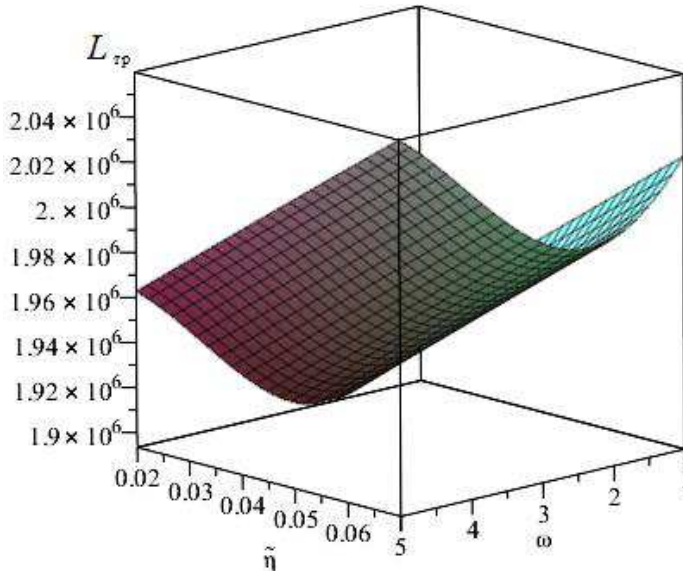


Рис. 3. Зависимость параметров $\tilde{\eta}$ и ω от силы трения

Точное автомодельное решение задачи находим по известному методу [34-35]. В результате для поля скоростей и давления получим:

$$\tilde{\Psi}'(\xi) = \frac{\tilde{c}_2}{2} (\xi^2 - \xi), \quad \tilde{v}(\xi) = \frac{\tilde{c}_1 \xi^2}{2} - \left(\frac{\tilde{c}_1}{2} - 1 - e_1 \right) \xi - 1 - e_1, \quad \tilde{c}_1 = -6(1 + e_1);$$

$$p = 1 + \Lambda \int_0^x \left(\frac{\tilde{c}_1}{(1 + \alpha^*)^2 (1 + \tilde{\eta}x - \tilde{\eta}_1 \sin \omega x)^2} + \frac{\tilde{c}_2}{p(1 + \alpha^*)^3 (1 + \tilde{\eta}x - \tilde{\eta}_1 \sin \omega x)^3} \right) dx, \quad (4)$$

где $\tilde{\eta} = \frac{\eta}{1 + \alpha^*}$, $\tilde{\eta}_1 = \frac{\eta_1}{1 + \alpha^*}$, $\tilde{c}_2 = -\tilde{c}_1 (1 + \alpha^*) \left(1 + \frac{\tilde{\eta}}{2} + \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega - 1) \right)$;

константу \tilde{c}_2 определяем из граничного условия $p(0) = p(1) = p_a$.

Решая уравнение для гидродинамического давления методом последовательных приближений, имеем:

$$p_0 = 1, \quad p_1 = 1 + \Lambda \int_0^x \left(\frac{\tilde{c}_1}{(1 + \alpha^*)^2 (1 + \tilde{\eta}x - \tilde{\eta}_1 \sin \omega x)^2} + \frac{\tilde{c}_2}{p(1 + \alpha^*)^3 (1 + \tilde{\eta}x - \tilde{\eta}_1 \sin \omega x)^3} \right) dx, \quad (5)$$

$$p_1 = 1 + \frac{\Lambda \tilde{c}_1}{(1 + \alpha^*)^2} \left[\tilde{\eta} \frac{x^2}{2} - \frac{\tilde{\eta}x}{2} + \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega x - 1) - \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega - 1)x \right].$$

Решим задачу об устойчивости движения направляющей.

Обозначим ширину направляющей \bar{H} , массу направляющей M^* , действующую силу Q ; $\frac{M^*}{l\bar{H}} = m$; $\frac{Q}{l\bar{H}} = q$.

Тогда деформированное уравнение движения направляющей имеет вид:

$$\frac{de'}{dt'} = \frac{q}{m} + \frac{L_{\text{тр}}}{mH}. \quad (6)$$

Запишем уравнение (6) в безразмерном виде:

$$\frac{de'}{dt} = A_1 - A_2 e_1, \quad (7)$$

где

$$A_1 = -\frac{qt^*}{mu^*} - \frac{\mu lt^*}{h_0(1+\alpha^*)mH} \left\{ \left[\frac{3}{\bar{p}} \left(1 - \tilde{\eta} - \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega - 1) \right) \right] + 4 \left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{2} - \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega - 1) \right) \right\},$$

$$A_2 = \frac{\mu lt^*}{h_0(1+\alpha^*)mH} \left\{ \left[\frac{3}{\bar{p}} \left(1 - \tilde{\eta} - \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega - 1) \right) \right] + \left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{2} - \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega - 1) \right) \right\},$$

$$e_1 = \frac{A_1}{A_2} \left(e^{-A_2 t} - 1 \right),$$

здесь $\bar{p}(\Lambda) = \sup_{x \in [0;1]} p_1$.

Результаты и их обсуждение

Из результатов численного анализа, приведенных на рисунках 2, 3, а также из найденных аналитических выражений (5):

– несущая способность клиновидной опоры, а также сила трения существенно зависят от параметра сжимаемости Λ и параметра α^* , обусловленного наличием расплава на поверхности направляющей и нелинейности (адаптивности) опорной поверхности ползуна;

– из найденного решения (7) следует, что при $t \rightarrow \infty$ скорость скольжения e_1 достигает предельного значения ($e_1 \rightarrow \infty$). При этом рассматриваемая система стремится к стационарному режиму.

Список литературы

1. 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.
2. 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.

3. 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.
4. 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.
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. 2018, vol. 158, pp. 246-253. doi.org/10.2991/avent-18.2018.47.
6. 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.
7. Vasilenko V.V., Lagunova E.O., Mukutadze M.A., Prikhodko V.M. Calculation model of the radial bearing, caused by the melt, taking into account the dependence of viscosity on pressure // International Journal of Applied Engineering Research. 2017, vol. 12, no. 19, pp. 9138-9148.
8. 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 Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – №2(66). – С. 129-135.
9. 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.
10. Расчетная модель гидродинамической смазки неоднородного пористого подшипника конечной длины, работающего в устойчивом нестационарном режиме трения при наличии принудительной подачи смазки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1765>.
11. Мукутадзе М.А., Лагунова Е.О., Гармонина 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.
12. Ахвердиев К.С., Лагунова Е.О., Мукутадзе М.А. Гидродинамический расчет радиального подшипника при наличии электромагнитного поля с учетом зависимости вязкости и электропроводимости от температуры // Вестник Донского государственного технического университета. – 2009. – Т. 9, № 3 (42). – С. 529-536.
13. Mukutadze M.A., Vasilenko V.V., Mukutadze A.M., Opatskikh A.N. Mathematical model of a plain bearer lubricated with molten metal // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, vol. 378, p. 012021. doi.org/10.1088/1755-1315/378/1/012021.

14. Разработка расчетной модели радиального подшипника с учетом зависимости проницаемости, электропроводности и вязкости жидкого смазочного материала от давления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/74TVN616.pdf>.
15. Лагунова Е.О., Мукутадзе М.А. Расчет радиального подшипника скольжения с легкоплавким покрытием // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, № 1. – С. 112-120.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Кохановский В.А., Мукутадзе М.А. Матричные материалы антифрикционных композитов // Вестник Донского государственного технического университета. – 2001. – Т. 1. № 2. – С. 51-56.
20. 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.
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. 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.
23. Расчетная модель радиального подшипника скольжения с повышенной несущей способностью, работающего на микрополярной смазке с учетом ее вязкостных характеристик от давления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2200>.
24. 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.
25. Расчетная модель упорного подшипника скольжения с повышенной несущей способностью, работающего на неньютоновских смазочных материалах с адаптированной опорной поверхностью [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2201>.

26. 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.
27. 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.
28. Гидродинамический расчет радиального подшипника, смазываемого расплавом легкоплавкого покрытия при наличии смазочного материала [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://naukovedenie.ru/PDF/20TVN517.pdf>.
29. 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.
30. 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.
31. 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.
32. 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.
33. 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.
34. 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.
35. Мукутадзе М.А. Разработка системы расчетных моделей подшипников скольжения на основе развития гидродинамической и реодинамической теории смазки: Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2015. – 38 с.

References

1. 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.
2. 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.
 3. 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.
 4. 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.
 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. 2018, vol. 158, pp. 246-253. doi.org/10.2991/avent-18.2018.47.
 6. 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.
 7. Vasilenko V.V., Lagunova E.O., Mukutadze M.A., Prikhodko V.M. Calculation model of the radial bearing, caused by the melt, taking into account the dependence of viscosity on pressure // International Journal of Applied Engineering Research. 2017, vol. 12, no. 19, pp. 9138-9148.
 8. 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.
 9. 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.
 10. 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]. – Access mode: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1765>.
 11. 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.
 12. 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.
 13. Mukutadze M.A., Vasilenko V.V., Mukutadze A.M., Opatskikh A.N. Mathematical model of a plain bearer lubricated with molten metal // IOP Conference Series: Earth

- and Environmental Science. 2019, vol. 378, p. 012021. doi.org/10.1088/1755-1315/378/1/012021.
14. 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]. – Access mode: <http://naukovedenie.ru/PDF/74TVN616.pdf>.
 15. 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. – ISSN 0202-4977.
 16. 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.
 17. 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.
 18. 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.
 19. 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.
 20. 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.
 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. 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.
 23. 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]. – Access mode: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2200>.
 24. 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.
 25. Calculation model of a thrust sliding bearing with increased bearing capacity operating on non-Newtonian lubricants with an adapted bearing surface [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2201>.
 26. 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.

27. 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.
28. Hydrodynamic calculation of a radial bearing lubricated by a melt of a fusible coating in the presence of a lubricant [Electronic resource]. – Access mode: <https://naukovedenie.ru/PDF/20TVN517.pdf>.
29. 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.
30. 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.
31. 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.
32. 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.
33. 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.
34. 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.
35. 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. sci. – Rostov-on-Don: RSUPS, 2015. – 38 p.

Куманин Станислав Витальевич – аспирант	Kumanin Stanislav Vitalyevich – graduate student
kafedra.zdv.rgups@mail.ru	

Received 23.06.2023