

<https://doi.org/10.26160/2572-4347-2022-16-15-23>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА В РАБОЧЕМ ЗАЗОРЕ КЛИНОВИДНОЙ ОПОРЫ СКОЛЬЖЕНИЯ

*Абдулрахман Х.Н., Мукутадзе М.А., Киришчиева В.И., Задорожная Н.С.
Ростовский государственный университет путей сообщения,
Ростов-на-Дону, Россия*

Ключевые слова: неполное заполнение рабочего зазора, микрополярная жидкость, металлическое покрытие, адаптированный профиль, точное автомодельное решение.

Аннотация. В статье на основе общеизвестного уравнения течения жидкости для «тонкого слоя», уравнения неразрывности и уравнения, описывающего профиль расплавленного контура покрытия, найдено асимптотическое и точное автомодельное решение течения микрополярного смазочного материала в рабочем зазоре клиновидной опоры скольжения при неполном заполнении рабочего зазора.

SIMULATION OF LUBRICANT FLOW IN THE WORKING GAP OF A WEDGE-SHAPED SLIDING SUPPORT

*Abdulrahman H.N., Mukutadze M.A., Kirishchieva V.I., Zadorozhnaya N.S.
Rostov State Railway University, Rostov-on-Don, Russia*

Keywords: incomplete filling of the working gap, micropolar liquid, metal coating.

Abstract. In the article, based on the well-known fluid flow equation for a "thin layer", the continuity equation and the equation describing the profile of the molten coating contour, an asymptotic and exact self-similar solution of the flow of a micropolar lubricant in the working gap of a wedge-shaped sliding support with incomplete filling of the working gap is found.

Введение

В условиях высоких скоростей и значительных динамических нагрузок применение подшипников скольжения в опорных узлах становится востребованным. Отсутствие в достаточной мере теоретических и экспериментальных исследований, посвященных изучению работоспособности клиновидных опор скольжения в реальных условиях функционирования, и сложность решения теоретической задачи определяют актуальность данной статьи.

Разработке расчетных моделей подшипников скольжения с металлическими покрытиями на подвижных и неподвижных контактных поверхностях посвящено много работ [1-13]. В связи с тем, что процесс смазывания на расплавах покрытия не является самоподдерживающимся процессом [14-23], ученые предпринимают попытку восполнить этот недостаток путем увеличения смазочного материала рабочего зазора, т. е. применяя подшипники скольжения с металлическими покрытиями и нестандартным опорным профилем опорной поверхности с учетом применения смазочных материалов, обладающих неньютоновскими реологическими свойствами.

Условия задачи

Рассмотрим установившееся течение несжимаемой жидкости и расплава покрытия в рабочем зазоре клиновидной опоры скольжения, которая имеет на поверхности опорного кольца металлическое покрытие, а поверхность ползуна адаптирована к условиям трения профиля (рис. 1).



Рис. 1. Рабочая схема: 1 – контур наклонного ползуна (пяты); 2 – контур расплавленного подпятника; 3 – контур нестандартного опорного профиля

Для решения задачи используем общеизвестные безразмерные уравнения течения смазочного материала для «тонкого слоя», уравнение неразрывности и уравнение, описывающее профиль расплавленного контура покрытия поверхности опорного кольца, с соответствующими граничными условиями.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{N^2}{2N_1 h(x)} (2y - h) = \frac{dp}{dx}, \quad v = \frac{1}{2N_1 h} (y^2 - hy), \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{d\Phi(x)}{dx} = -K \int_{-\Phi(x)}^{h(x)} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 dy. \quad (1)$$

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

$$v = 0, \quad v = 0, \quad u = -1 \quad \text{при} \quad y = -\Phi(x); \quad p(x_1) = p(x_2) = 0. \quad (2)$$

$$\text{где } K = \frac{2\mu u^*}{h_0 L'}; \quad \eta = \frac{L \operatorname{tg} \alpha}{h_0}; \quad \eta_1 = \frac{a'}{h_0}.$$

Уравнение контуров наклонного ползуна, расплавленного контура покрытия опорного кольца наклонного ползуна с нестандартным профилем заданы в виде:

$$C_0 : y' = h_0 + x' \operatorname{tg} \alpha, \quad C_1 : y' = h_0 + x' \operatorname{tg} \alpha - a' \sin \omega x', \quad C_2 : y' = -\lambda f'(x'), \quad (3)$$

Применим асимптотическое разложение по параметру характеризующего расплав покрытия, в результате для нулевого (без учета

расплава) и первого (с учетом расплава) получим следующие системы уравнений с соответствующими граничными условиями:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u_0}{\partial y^2} + \frac{N^2}{2N_1 h} (2y - h) &= \frac{dp_0}{dx}, & \frac{\partial v_0}{\partial x} + \frac{\partial u_0}{\partial y} &= 0, \\ v_0 = 0, \quad v_0 = 0, \quad u_0 = 0 & \text{ при } y = 1 + \eta x - \eta_1 \sin \omega x; \\ v_0 = 0, \quad u_0 = -1, \quad v_0 = 0 & \text{ при } y = 0; \quad p_0(x_1) = p_0(x_2) = 0; \\ \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} = \frac{dp_1}{dx}, & \quad \frac{\partial v_1}{\partial x} + \frac{\partial u_1}{\partial y} = 0, & -\frac{d\Phi_1(x)}{dx} &= K \int_{-\Phi_0}^{h(x)} \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} \right)^2 dy; \\ v_1 = \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} \right) \Big|_{y=0} \cdot \Phi_1(x); & \quad u_1 = \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} \right) \Big|_{y=0} \cdot \Phi_1(x); \\ v_1 = 0, \quad v_1 = 0, \quad u_1 = 0 & \text{ при } y = h(x) + \tilde{\Phi}; \quad p_1(x_1) = p_1(x_2) = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Далее для нахождения поля скоростей и давлений в смазочном слое применим общеизвестный метод точного автомодельного решения [24] для нулевого и первого приближения. В результате имеем:

– для нулевого приближения:

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}'_0(\xi) &= \frac{\tilde{C}_2}{2} (\xi^2 - \xi), & \tilde{C}_1 &= 6. \\ \tilde{u}_0(\xi) &= \tilde{C}_1 \frac{\xi^2}{2} - \frac{N^2}{2N_1} \left(\frac{\xi^2}{3} - \frac{\xi^2}{2} \right) - \left(\frac{N^2}{12N_1} + \frac{\tilde{C}_1}{2} + 1 \right) \xi + 1. \\ p_0 &= 6 \left(\frac{\eta}{2} (x - x_1)(x - x_2) + \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega x - \cos \omega x_1) + \frac{\eta_1 (x - x_1)}{\omega (x_2 - x_1)} (\cos \omega x_2 - \cos \omega x_1) \right), \end{aligned} \quad (6)$$

– для первого приближения:

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}'_1(\xi) &= \frac{\tilde{C}_2}{2} (\xi^2 - \xi), & \tilde{C}_1 &= 6M. \\ \tilde{u}_1(\xi) &= \tilde{C}_1 \frac{\xi^2}{2} - \left(\frac{\tilde{C}_1}{2} + M \right) \xi + M; \\ p_1 &= \frac{6M}{(1 + \tilde{\Phi})^2} \left(\frac{\tilde{\eta}}{2} (x - x_1)(x_2 - x) + \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega x_2 - \cos \omega x) + \frac{\tilde{\eta}_1 (x_2 - x)}{\omega (x_2 - x_1)} (\cos \omega x_2 - \cos \omega x_1) \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Для функций, определяющих расплавленный контур опорного кольца, имеем:

$$\Phi_1(x) = x - \frac{1}{2} \eta x^2 - \frac{\eta_1}{\omega} \cos \omega x + \frac{N^4}{720N_1^2} \left(x - \frac{\eta}{2} x^2 - \frac{\eta_1}{\omega} \cos \omega x \right) + h_0^*. \quad (8)$$

С учетом аналитических выражений (6)-(8) определим нагрузочную способность и силу трения:

$$W = p^* L \int_{x_1}^{x_2} (p_0 + Kp_1) dx. \quad (9)$$

$$L_{\text{тр}} = \int_{x_1}^{x_2} \left[\left. \frac{\partial u_0}{\partial y} \right|_{y=0} + K \left. \frac{\partial u_1}{\partial y} \right|_{y=0} \right] dx. \quad (10)$$

В заключение теоретического исследования проведен численный анализ. В результате численного анализа установлено, что несущая способность нестандартных опор скольжения, адаптированных к условиям трения опорным профилем, может быть повышена в диапазоне исследованных нагрузочно-скоростных режимов на 7-8 % по сравнению с подшипником со стандартной опорной поверхностью, при этом коэффициент трения снижается на 3-10 %.

Для верификации и подтверждения эффективности полученных теоретических исследований проведено экспериментальное исследование, результаты которого представлены в таблице 1.

Табл. 1. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований

№	Теоретические исследования			Экспериментальные исследования	
	Без покрытия	С покрытием	С покрытием и адаптированным профилем	С покрытием из сплава Вуда и адаптированным профилем	
Коэффициент трения	1	0,0068	0,0048	0,0032	0,0034
	2	0,0069	0,0049	0,0031	0,0035
	3	0,0072	0,0050	0,0029	0,0026
	4	0,0070	0,0052	0,0028	0,0030
	5	0,0067	0,0054	0,0030	0,0032

Заключения и выводы

Разработаны новые аналитические выражения с учетом дополнительных факторов для основных рабочих характеристик клиновидной опоры скольжения с учетом реологических свойств микрополярного смазочного материала при неполном заполнении рабочего зазора, а также с учетом расплава поверхности покрытия.

В результате теоретического и экспериментального исследования получены уточненные расчетные модели модифицированных клиновидных опор скольжения за счет учета дополнительных факторов, ранее не учитывающихся, которые позволяют регулировать соотношение его несущей способности и коэффициента трения за счет варьирования металлического покрытия и адаптированного опорного профиля к условиям трения, приводящие к увеличению износостойкости.

Условные обозначения:

h_0 – толщина смазочного материала; h_0^* – толщина расплава; α – угол наклонного ползуна с осью Ox ; a' – амплитуда возмущения; ω' – параметр адаптированного профиля ползуна; $\lambda'f'(x')$ – функция, определяющая профиль расплавленного контура покрытия.

Список литературы

1. 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. P. 4644-4650.
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 // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4 (27). С. 22.
3. 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 // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4 (27). С. 23.
4. 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 // Инженерный вестник Дона. 2013. № 3 (26). С. 9.
5. Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Semenko I.S. Hydrodynamic calculation of a thrust plain bearing that operates with viscoelastic lubricant under turbulent friction conditions // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2011. Vol. 40. No. 4. P. 359-365
6. 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. Сбор. научн. трудов X Международной конференции. СПб.: СПбГУПС, 2010. С. 15-24.
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 ДГТУ. 2010. Т.10. № 2 (45). С. 217-223.
8. 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.

9. 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 ДГТУ. 2009. Т.9. № 3 (42). С. 529-536
10. 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
11. Мукутадзе М.А. Разработка системы расчетных моделей подшипников скольжения на основе развития гидродинамической и реодинамической теории смазки: Автореферат дисс. ... докт. техн. наук. Ростов-на-Дону: РГУПС, 2015.
12. 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 РГУПС. 2008. № 4 (32). С. 131-138.
13. 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 РГУПС. 2008. № 1 (29). С. 147-151.
14. Мукутадзе М.А., Хасьянова Д.У., Мукутадзе А.М. Гидродинамическая модель клиновидной опоры скольжения с легкоплавким металлическим покрытием // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. № 4. С. 51-58.
15. 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. International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering. 2019. P. 012021.
16. 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. P. 012031.
17. Mukutadze M.A., Khasyanova D.U. Radial friction bearing with a fusible coating in the turbulent friction mode // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2019. Vol. 48. No. 5. P. 421-430.
18. Akhverdiev K.S., Lagunova E.O., Mukutadze M.A. Calculated model of wedge-shaped sliding supports taking into account rheological properties of viscoelastic lubricant // Advances in Engineering Research. Proceedings of the International Conference "Aviamechanical engineering and transport" (AVENT 2018). 2018. P. 246-253.
19. Mukutadze M.A., Khasyanova D.U. Optimization of the supporting surface of a slider bearing according to the load-carrying capacity taking into account the lubricant viscosity depending on pressure and temperature // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2018. Vol. 47. No. 4. P. 356-361.

20. Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Vasilenko V.V. Development of the design model of a hydrodynamic lubricating material formed during melting of the axial bearing, in the presence of forced lubrication // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2018. Vol. 47. No. 3. P. 271-277.
21. 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*. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2020. 2021. P. 012005.
22. Кохановский В.А., Мукутадзе М.А. Матричные материалы антифрикционных композитов // *Вестник ДГТУ*. 2001. Т. 1. № 2. С. 51-56.
23. Lagunova E.O., Mukutadze M.A. Calculation of a radial slider bearing with a fusible coating // *Journal of Friction and Wear*. 2019. Vol. 40. No. 1. P. 88-94.
24. Mukutadze M.A., Khasyanova D.U. Optimization of the supporting surface of a slider bearing according to the load-carrying capacity taking into account the lubricant viscosity depending on pressure and temperature // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2018. Vol. 47. No. 4. P. 356-361.

References

1. 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. P. 4644-4650.
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 // *Engineering Bulletin of the Don*. 2013. No. 4 (27). P. 22.
3. Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Solop K.S. Calculation model of a thrust sliding bearing with increased load-bearing capacity operating on non-Newtonian lubricants with an adapted bearing surface // *Engineering Bulletin of the Don*. 2013. No. 4 (27). P. 23.
4. 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 // *Engineering Bulletin of the Don*. 2013. No.3(26). P. 9.
5. Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Semenko I.S. Hydrodynamic calculation of a thrust plain bearing that operates with viscoelastic lubricant under turbulent friction conditions // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2011. Vol. 40. No. 4. P. 359-365
6. 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: SPbGTU, 2010. P. 15-24.
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 DSTU. 2010. Vol. 10. No. 2 (45). P. 217-223.
 8. Akhverdiev K.S.O., Mukutadze M.A., Shamshin 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. P. 11-17.
 9. Akhverdiev K.S., Logunova 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 DSTU. 2009. Vol. 9. No. 3 (42). P. 529-536
 10. 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. P. 12-15.
 11. 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 diss. ... doct. tech. sc. Rostov-on-Don: RSTU, 2015.
 12. 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 RSTU. 2008. No.4(32). P.131-138.
 13. Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Savenkova M.A., Vovk A.Yu. A mathematical model of hydrodynamic lubrication of a radial bearing operating in a non-stationary mode on micropolar lubrication // Bulletin of the RSTU. 2008. No. 1 (29). P. 147-151.
 14. Mukutadze M.A., Khasyanova D.U., Mukutadze A.M. Hydrodynamic model of a wedge-shaped sliding support with a fusible metal coating // Problems of mechanical engineering and machine reliability. 2020. No. 4. P. 51-58.
 15. 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. International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering. 2019. P. 012021.
 16. 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. P. 012031.
 17. Mukutadze M.A., Khasyanova D.U. Radial friction bearing with a fusible coating in the turbulent friction mode // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2019. Vol. 48. No. 5. P. 421-430.

18. Akhverdiev K.S., Lagunova E.O., Mukutadze M.A. Calculated model of wedge-shaped sliding supports taking into account rheological properties of viscoelastic lubricant // *Advances in Engineering Research. Proceedings of the International Conference "Aviamechanical engineering and transport" (AVENT 2018)*. 2018. P. 246-253.
19. Mukutadze M.A., Khasyanova D.U. Optimization of the supporting surface of a slider bearing according to the load-carrying capacity taking into account the lubricant viscosity depending on pressure and temperature // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2018. Vol. 47. No. 4. P. 356-361.
20. Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Vasilenko V.V. Development of the design model of a hydrodynamic lubricating material formed during melting of the axial bearing, in the presence of forced lubrication // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2018. Vol. 47. No. 3. P. 271-277.
21. 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. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2020*. 2021. P. 012005.
22. Kohanovskiy V.A., Mukutadze M.A. Matrix materials of antifriction composites // *Bulletin of the DSTU*. 2001. Vol. 1. No. 2. P. 51-56.
23. Lagunova E.O., Mukutadze M.A. Calculation of a radial slider bearing with a fusible coating // *Journal of Friction and Wear*. 2019. Vol. 40. No. 1. P. 88-94.
24. Mukutadze M.A., Khasyanova D.U. Optimization of the supporting surface of a slider bearing according to the load-carrying capacity taking into account the lubricant viscosity depending on pressure and temperature // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2018. Vol. 47. No. 4. P. 356-361.

Абдулрахман Хайдар Нофалевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика»	Abdulrahman Haidar Nofalevich – candidate of physical and mathematical sciences, associate professor of the Department of higher mathematics
Мукутадзе Мурман Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Высшая математика»	Mukutadze Murman Aleksandrovich – doctor of technical sciences, professor of the Department of higher mathematics
Киришчиева Виктория Игоревна – аспирант	Kirishchieva Victoria Igorevna – postgraduate student
Задорожная Наталья Сергеевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика»	Zadorozhnaya Natalia Sergeevna – candidate of physical and mathematical sciences, associate professor of the Department of higher mathematics
Murman1963@yandex.ru	

Received 28.04.2022