

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОЧАСТИЦ TiO_2 И CuO В КАЧЕСТВЕ ПРИСАДОК К СМАЗОЧНОМУ МАСЛУ

© 2022 г. Neha Deepak Saxena^{1,2,*}, Nathi Ram Chauhan²

¹ JSS Academy of Technical Education, Noida, 201301 India

² Indira Gandhi Delhi Technical Institute for women, Kashmere Gate, Delhi, 110006 India

*E-mail: nehadeepaksaxena@gmail.com

Поступила в редакцию 28 июня 2021 г.

После доработки 19 октября 2022 г.

Принята к публикации 11 ноября 2022 г.

Статья посвящена рабочим характеристикам наносмазок TiO_2 и CuO , используемых в подшипниках скольжения. Разработана вязкостная модель для определения корреляции между вязкостью и температурой моторного масла SAE 20W40 и анализа рабочих характеристик подшипников скольжения. Введение наночастиц в традиционное смазочное моторное масло оказывает значительное влияние на данные характеристики. Результат вычислений показывает, что накопление наночастиц увеличивает вязкость базового моторного масла и улучшает рабочие характеристики подшипников скольжения.

Ключевые слова: подшипник скольжения, наносмазка, вязкость, нагрузочная способность, коэффициент эксцентриситета

DOI: 10.31857/S0028242122060259, **EDN:** NTEUBC

Двадцать первый век – самый инновационный для нанотехнологий. Было проведено большое количество исследований трибологических свойств смазочных наноматериалов, которые называют наносмазками. Сочетание нанотехнологий и химии наноматериалов сделало возможным использование наноксидов металлов в качестве смазки [1]. Многие ученые уделяют большое внимание нанобиолубрикантам, поскольку они обладают превосходными химическими, термическими, магнитными и антифрикционными свойствами, а также проявляют уникальные каталитические, оптические и полупроводниковые свойства [2].

Наночастицы играют важную роль в улучшении теплофизических свойств традиционных смазочных материалов. Исследователь определяет влияние наночастиц на трибологические характеристики масляной смазки с учетом химических, физических и морфологических параметров нано-

частиц [3]. В настоящее время наибольшее опасение вызывают тяжелые условия эксплуатации подшипников и потери энергии в них. Исследователи усердно работают над сведением к минимуму этих потерь за счет разработки такой смазывающей жидкости, с применением которой холодное оборудование функционировало бы наиболее эффективно и результативно в критических условиях. Поэтому многие трибологи сосредотачиваются на опорном механизме подшипников скольжения для применения в условиях высоких скоростей [4].

Основное направление исследований по эксплуатации тяжелонагруженных и высокоскоростных вращающихся машин – состояние гидродинамических подшипников скольжения. Когда они работают под большой нагрузкой и при этом вращаются с высокой скоростью, то из-за напряжения сдвига и большого количества образующейся теплоты снижается вязкость смазки, что влияет на функ-

ционирование гидродинамических подшипников скольжения. Поэтому исследователи в первую очередь осуществляют термогидродинамический анализ подшипников, а во вторую – работают над повышением вязкости смазочного материала [5]. В середине 20 в. ученые начали решать дифференциальное уравнение, используя уравнение Рейнольдса, для расчета таких рабочих характеристик эллиптического подшипника скольжения, как потеря мощности, коэффициент эксцентриситета, расход смазывающей жидкости. При анализе эллиптических подшипников скольжения исследователи допускают незначительные потери теплоты в окружающую среду.

В 1984 г. Singh A. и Gupta B.K. [6] использовали уравнение Рейнольдса для определения устойчивости подшипников скольжения. Кроме того, ученые оценили предел устойчивости при различных значениях коэффициента эксцентриситета и отношения длины к диаметру подшипника (L/D). Первая модель вязкости, разработанная в исследовании Wu Y. с соавт. в 2007 г. [7], определяет рабочие характеристики подшипников скольжения. В 2008 г. в работе Gertzos K.P. с соавт. [8] впервые применили метод вычислительной гидрогазодинамики (CFD) «FLUENT» для определения рабочих характеристик подшипников. Они же разработали данные и диаграммы, которые можно будет использовать в будущем для проектирования подшипников скольжения [8]. В работе Chauhan A. и др. [9] авторы сравнили тепловое разложение трех разных сортов нефти. В 2010 г. исследователи использовали метод конечных разностей (FDM) для решения уравнения Рейнольдса и уравнения энергии. В том же году Strezelecki S. и Ghoneam S.M. [10] рассчитали распределение давления и температуры масляной пленки при повышенной температуре с помощью геометрического уравнения. Кроме того, было рассмотрено влияние зазора на повышенную температуру подшипников скольжения. В 2014 г. в исследовании Binu K.G. с соавт. [11] была разработана модифицированная модель вязкости Кригера—Догерти, определяющая нагрузочную способность подшипника скольжения. Авторы использовали наночастицы TiO_2 для диспергирования в базовом моторном масле и сравнили результаты с параметрами базового моторного масла. Kalakada S.B. с соавт. [12] в 2015 г. тоже разработали модель под-

шипника скольжения и определили статические рабочие характеристики как в термовязкостном, так и в нетермовязкостном случае. И, наконец, исследователи пришли к выводу, что добавление наночастиц улучшает статические рабочие характеристики в большей степени в термовязкостном случае. Данные о вязкости, собранные в публикации Wu Y. в [7], были использованы в исследованиях Nair K.P. с соавт. в 2009 г. [13] и Shenoy B.S. с соавт. в 2012 г. [14]. Авторы пришли к выводу, что применение наночастиц в смазке повышает нагрузочную способность подшипников скольжения при различных значениях коэффициента эксцентриситета. Кроме того, Wang X. и Zhu K. [15] используют микрополярную жидкость и определяют производительность динамически нагруженного подшипника скольжения в зависимости от размера материала, характерной длины и номера муфты.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДОЛОГИЯ

В качестве базового масла было использовано высококачественное моторное масло SAE 20W40, изготовленное по самым высоким мировым стандартам и подходящее для большинства современных легковых автомобилей с бензиновым двигателем и тяжелых дизельных автомобилей. В этом эксперименте были приготовлены наносмазки концентрацией 0.1 и 0.2 мас. %. Массовую концентрацию наносмазочного материала (φ) рассчитывали по формуле:

$$\varphi = \left[\frac{\frac{M_{np}}{\rho_{np}}}{\left(\frac{M_{np}}{\rho_{np}} + \frac{M_{bf}}{\rho_{bf}} \right)} \right] \times 100,$$

где M_{np} – масса наночастицы; ρ_{np} – плотность наночастицы; M_{bf} – масса базовой жидкости; ρ_{bf} – плотность базовой жидкости [например, плотность наночастиц CuO составляет 6300 кг/м^3 , а плотность моторного масла SAE 20W40 – 830 кг/м^3 , если $\varphi = 0.1\%$, то масса $M_{np} \approx 0.76 \text{ г}$]

Массу наночастиц точно измеряли с помощью электронных весов.

Таблица 1. Технические характеристики моторного масла SAE 20W40

Свойства	Значение
Плотность, кг/м ³	830
Кинематическая вязкость при 100°C, сСт	11.48
Кинематическая вязкость при 40°C, сСт	98
Индекс вязкости, ррт	104.0
Температура вспышки, °C	218.4
Содержание сульфатного зольного остатка, %	0.0096
Температура воспламенения, °C	231.2
Температура застывания, °C	-10

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Имеющиеся на рынке моторные масла марки SAE 20W40, TiO₂ и CuO были закуплены у коммерческого источника. Наночастицы TiO₂ (т. пл. 1843°C) и CuO (т. пл. 1326°C), имеющие белый и черный цвет соответственно, с относительной плотностью 3900 и 6300 кг/м³ соответственно, при температуре 25°C и удельной площадью поверхности 13.1 м²/г, были добавлены в базовое моторное масло марки SAE 20W40 в различных концентрациях (0.1 и 0.2 мас. %). Наночастицы TiO₂ и CuO, смешанные с SAE 20W40 в различных концентрациях, наряду с поверхностно-активной олеиновой кислотой, повышают стабильность смазки. Свойства моторного масла SAE 20W40 приведены в табл. 1. Во время опытов наблюдалось значительное изменение физико-химических свойств смазочного материала SAE 20W40 при добавлении обоих типов наночастиц в концентрации 0.1 и 0.2 мас. %. К этим свойствам относятся вязкость, температура

вспышки, температура застывания и другие параметры. Для измерения температуры застывания и температуры вспышки смазочного материала были использованы стандарты ASTM D97 и ASTM D92 соответственно.

Подробная информация о моторном масле SAE 20W40 приведена в табл. 1.

В эксплуатацию вводили подшипник скольжения в условиях приготовленной наносмазки при различных геометрических и рабочих параметрах, показанных в табл. 2.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Для того, чтобы получить статические рабочие характеристики подшипника скольжения, работающего со смазкой, содержащей наночастицы TiO₂ и CuO, решается модифицированное уравнение Рейнольдса с использованием соответствующих граничных условий и мощного метода конечных элементов; при этом для математического расчета разработан код C++. Модель вязкости, применяемая в этом проекте, предназначена для определения связи между температурой и вязкостью. Различные статические характеристики, зависящие от нагрузочной способности и силы трения, рассчитываются с помощью программы и по результатам строятся графики.

Для статического расчета подшипника скольжения используется уравнение Рейнольдса и метод конечных разностей (FDM), закодированный в MATLAB. Кроме того, разработанная модель подшипника скольжения была подтверждена диаграммой Раймонди–Бойда, доступной в стандартной формулировке.

Таблица 2. Геометрические и рабочие параметры подшипника скольжения, используемые для анализа

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Материал подшипника	Латунь	Частота вращения N , об/мин	1490
Длина подшипника L , мм	100	Радиальная нагрузка, кН	От 0.32 до 0.72
Внутренний радиус подшипника R , мм	50.1	Расход смазочного масла, кПа	До to 500
Радиальный зазор C , мм	0.1	Распределение давления внутри подшипника, МПа	От 0 до 6.89
Радиус вала R_s , мм	50	Распределение температуры внутри подшипника, °C	До to 100

Допущения при вычислительном анализе:

- поведение жидкости ньютоновское на протяжении всего эксперимента;
- жидкость считается изо-вязкостной на протяжении всего эксперимента.

На рис. 1 показано распределение радиального давления в подшипнике скольжения при частоте вращения 1490 об/мин с разнесением точек измерения на угол 36° друг от друга.

Распределение давления в подшипнике скольжения можно рассчитать по формуле:

$$P = \frac{6W_j \mu \left(\frac{r}{C}\right)^2 \varepsilon \sin \theta (2 + \varepsilon \cos \theta)}{\left[(2 + \varepsilon^2)(1 + \varepsilon \cos \theta)^2\right]},$$

где P – давление на подшипник скольжения (кПа); W_j – нагрузка (Н); μ — динамическая вязкость (Н·с/м²); r – радиус подшипника (мм); C – диаметральный зазор (мм); ε – коэффициент эксцентриситета; $\theta =$ от 0° до 360°. Экспериментальные значения динамической вязкости приведены в табл. 3.

Влияние нагрузки на степень сжатия пленки в нижней части подшипника скольжения при частоте вращения 1490 об/мин представлено в табл. 4.

МОДЕЛЬ ВЯЗКОСТИ

Изменение вязкости смазочного материала в зависимости от температуры может быть представлено уравнением Вальтера и записано следующим образом:

$$\log(\log(\mu + 0.7)) = (k_1 - k_2) \log(T), \quad (1)$$

где T – температура; k_1, k_2 – константы; μ – вязкость смазочного материала; 0.7 – постоянная сдвига.

Таблица 3. Значение динамической вязкости при 40° для различных типов смазочных материалов

Типы смазочных материалов	Значение динамической вязкости при 40°, Н·с/м ²
Base oil (SAE20W40)	98
Base oil + 0.1% TiO ₂	102.94
Base oil + 0.2% TiO ₂	106.2
Base oil + 0.1% CuO	102.3
Base oil + 0.2% CuO	104.8

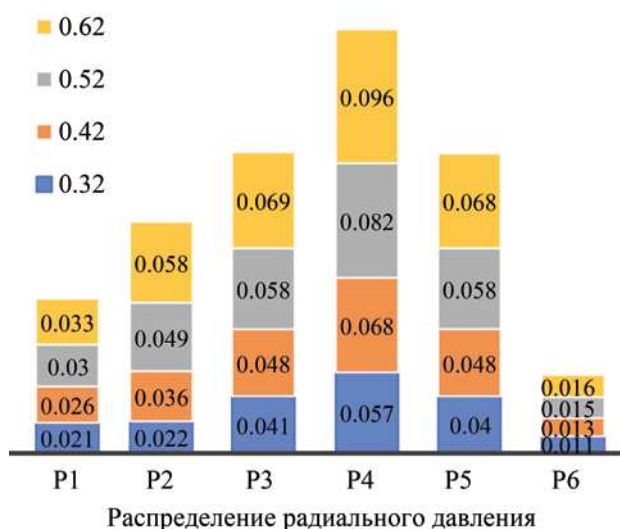


Рис. 1. Распределение радиального давления в нижней части подшипника скольжения при частоте вращения 1490 об/мин: P1–P6 – датчики давления, установленные на испытательном стенде с цапфовыми подшипниками; нагрузки 0.32, 0.42, 0.52, и 0.62 кН; по горизонтали – распределение давления от P1 до P6; по вертикали – значения, полученные от датчиков.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С использованием приведенной выше модели вязкости была получена зависимость нагрузочной способности от переменного коэффициента эксцентриситета при температуре 40 и 100°С, показанная на рис. 2, 3. Накопление наночастиц вызывает значительное увеличение нагрузочной способности, однако сравнение всех наночастиц при переменной концентрации показывает, что самое значительное увеличение нагрузочной способности дает смешивание наночастиц TiO₂ с моторным

Таблица 4. Влияние нагрузки на степень сжатия пленки в нижней части подшипника скольжения при частоте вращения 1490 об/мин

Нагрузка, кН	Степень сжатия пленки (частота вращения 1490 об/мин)
0.32	0.5452
0.42	0.5470
0.52	0.5461
0.62	0.5455

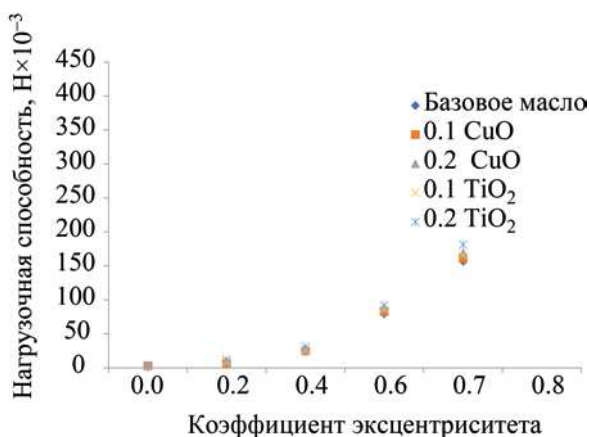


Рис. 2. Изменение нагрузочной способности (кН) в зависимости от коэффициента эксцентриситета при температуре 40°C.

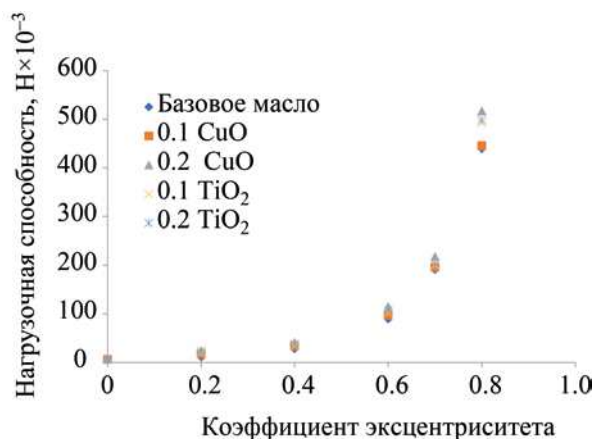


Рис. 3. Изменение нагрузочной способности (кН) в зависимости от коэффициента эксцентриситета при температуре 100°C.

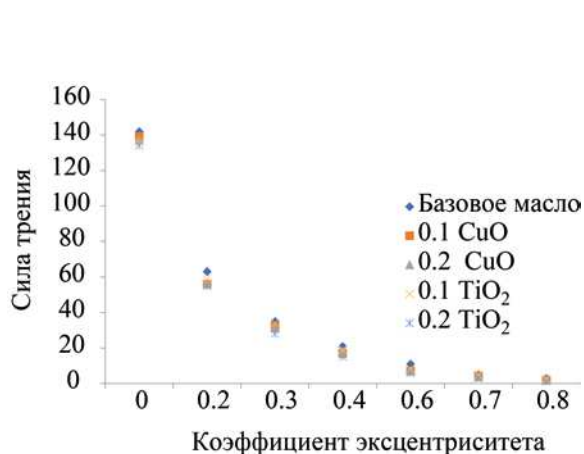


Рис. 4. Изменение силы трения в зависимости от коэффициента эксцентриситета при температуре 40°C.

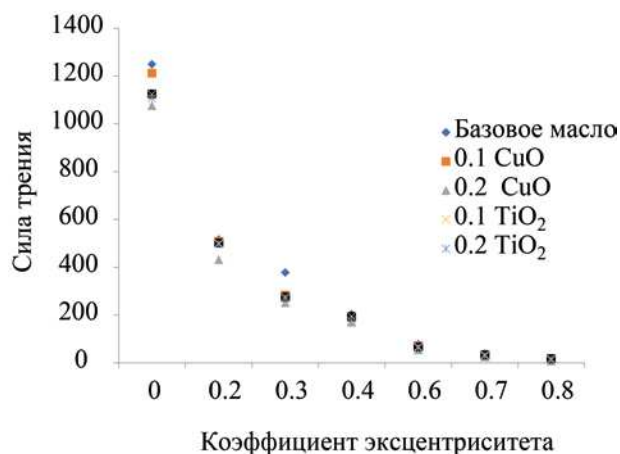


Рис. 5. Изменение силы трения в зависимости от коэффициента эксцентриситета при температуре 100°C.

маслом SAE 20W40. При рабочей температуре 40°C смазочные материалы, содержащие 0.2 мас. % наночастиц TiO₂, и смазочные материалы, содержащие 0.2 мас. % наночастиц CuO при 100°C, показывают более высокое значение нагрузочной способности по сравнению со всепогодными маслами и другими нанопокрывтиями. Максимальное изменение нагрузочной способности наблюдалось при значении коэффициента эксцентриситета от 0.6 до 0.7. Нагрузочная способность подшипника с нанопокрывтиями увеличивается с увеличением коэффициента эксцентриситета при температуре 100°C, как показано на рис. 3.

В соответствии с этими графиками, добавление наночастиц увеличивает нагрузочную способность и снижает силу трения даже при повышенной температуре. Таким образом, добавление наночастиц повышает стабильность работы системы подшипников.

Влияние смешивания различных наночастиц с моторным маслом SAE 20W40 на силу трения при температурах 40 и 100°C приведено на рис. 4 и 5. Добавление наночастиц уменьшает величину силы трения даже при повышенной температуре (100°C).

Изменение вязкости (сSt) в зависимости от температуры приведено на рис. 6. Также было заме-

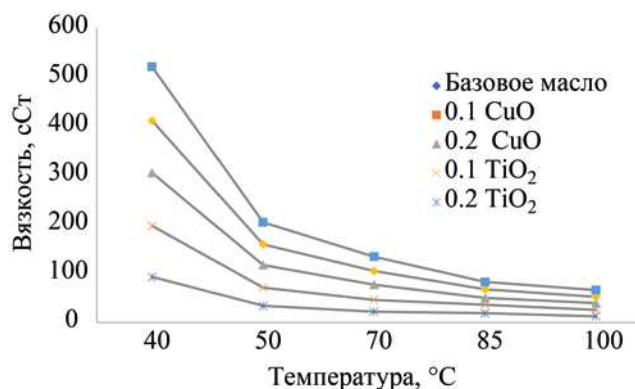


Рис. 6. Изменение вязкости (сСт) в зависимости от температуры (°C) у смазки с наночастицами и без них.

чено, что смазки с наночастицами обладают большей вязкостью, чем базовое моторное масло SAE 20W40.

ВЫВОДЫ

1. Нагрузочная способность подшипника гиперболически возрастает при увеличении коэффициента эксцентриситета.

2. Нагрузочная способность подшипника очень сильно зависит от вязкости жидкости.

3. Смазка с добавлением 0.2% наночастиц TiO₂ отличается более высокой нагрузочной способностью по сравнению с базовым маслом SAE 20W40 и другими наносмазками при температуре 40°C.

Увеличение нагрузочной способности от состава смазки:

0.2% TiO₂ > 0.2% CuO > 0.1% CuO > 0.1% TiO₂ > SAE 20W40.

4. Смазка с добавлением 0.2% наночастиц CuO отличается более высокой нагрузочной способностью по сравнению с базовым маслом SAE 20W40 и другими наносмазками при температуре 100°C.

Увеличение нагрузочной способности:

0.2% CuO > 0.2% TiO₂ > 0.1% TiO₂ > 0.1% CuO > SAE 20W40.

5. Сила трения уменьшается по мере увеличения коэффициента эксцентриситета.

а) Смазка с добавлением 0.2% наночастиц TiO₂ дает хорошие результаты по снижению силы тре-

ния между сопрягаемыми поверхностями при нормальной температуре.

Уменьшение силы трения при 40°C наблюдается в ряду:

0.2% TiO₂ > 0.2% CuO > 0.1% TiO₂ > 0.1% CuO > SAE 20W40.

б) Смазка с добавлением 0.2% наночастиц CuO дает хорошие результаты по снижению силы трения между сопрягаемыми поверхностями при повышенной температуре.

Уменьшение силы трения при 100°C наблюдается в ряду:

0.2% CuO > 0.2% TiO₂ > 0.1% TiO₂ > 0.1% CuO > SAE 20W40.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующих раскрытия в данной статье.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Neha Deepak Saxena, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3042-2891>

Nathi Ram Chauhan, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4941-4998>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Chavali M.S., Nikolova M.P. Metal oxide nanoparticles and their applications in nanotechnology // SN Appl. Sci. 2019. V. 1. P. 607. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0592-3>
- Bakunin V.N., Suslov A.Y., Kuzmina G.N., Parenago O.P., Topchiev A.V. Synthesis and application of inorganic nanoparticles as lubricant components – a review // J. Nanopart. Res. 2004. V. 6. P. 273–284. <https://doi.org/10.1023/B:NANO.0000034720.79452.e3>
- Dai W., Kheireddin B., Gao H., Liang H. Roles of nanoparticles in oil lubrication // Tribol. Int. 2016. V. 102. P. 88–98. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.05.020>
- Yathish K., Binu K.G., Shenoy B.S., Rao D.S., Pai R. Study of TiO₂ nanoparticles as lubricant additive in two-axial groove journal bearing // Int. J. Aerosp. Mech. Eng. 2014. V. 8. № 11. P. 1829–35. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1096705>
- Kumar V., Shrivastava K., Narwat K., Sharma S.C., Performance of hydrodynamic journal bearing operating with shear-thinning lubricants. In: Recent Advances in Mechanical Engineering, Kumar A., Pal A., Kachhwaha S.S., Jain P.K.

- (eds.). Springer, Singapore. 2021. P. 761–776. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9678-0_63
6. *Singh A. and Gupta B.K.* Stability analysis of orthogonally displaced bearings // *Wear*. 1984. V. 97. № 1. P. 83–92. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(84\)90083-8](https://doi.org/10.1016/0043-1648(84)90083-8)
 7. *Wu Y., Tsui W., Liu T.* Experimental analysis of tribological properties of lubricating oils with nanoparticle additives // *Wear*. 2007. V. 262. P. 819–825. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.08.021>
 8. *Gertzos K.P., Nikolakopoulos P.G., Papadopoulos C.A.* CFD analysis of journal bearing hydrodynamic lubrication by Bingham lubricant // *Tribol. Int.* 2008. V. 41. № 12. P. 1190–1204. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.03.002>
 9. *Chauhan A., Sehgal R., Sharma R.K.* Thermo-hydrodynamic analysis of elliptical journal bearing with different grade oils // *Tribol. Int.* 2010. V. 43. № 11. P. 1970–1977. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.03.017>
 10. *Strzelecki S., Ghoneam S.M.* The effect of clearance variation on the maximum temperature of the oil film of cylindrical 3-lobe journal bearing, scientific problems of machines operation and maintenance // *Polish Academy of Science*. 2010. V. 1. № 161. P. 53–60. [bwmetal.element.baztech-article-bos5-0024-0019](http://www.bwmetal.element.baztech-article-bos5-0024-0019)
 11. *Binu K.G., Shenoy B.S., Rao D.S., Pai R.* A variable viscosity approach for the evaluation of load carrying capacity of oil lubricated journal bearing with TiO₂ nanoparticles as lubricant additives // *Procedia Material Science*. 2014. V. 6. P. 1051–1067. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.176>
 12. *Kalakada S.B., Kumarapillai P.N.N., Kumar P.K.R.* Static characteristics of thermohydrodynamic journal bearing operating under lubricants containing nanoparticles // *Ind. Lubr. Tribol.* 2015. V. 67. № 1. P. 38–46. <https://doi.org/10.1108/ILT-01-2013-0015>
 13. *Nair K.P., Ahmed M.S., Al-qahtani S.T.* Static and dynamic analysis of hydrodynamic journal bearing operating under nano lubricants // *Int. J. Nanopart.* 2009. V. 2. P. 251–262. <https://doi.org/10.1504/IJNP.2009.028757>
 14. *Shenoy B.S., Binu K.G., Pai R., Rao D.S., Pai R.S.* Effect of nanoparticle additives on the performance of an externally adjustable fluid film bearing // *Tribol. Int.* 2012. V. 45. № 1. P. 38–42. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.10.004>
 15. *Wang X., Zhu K.* A study of the lubricating effectiveness of micropolar fluids in a dynamically loaded journal bearing (T1516) // *Tribology Int.* 2004. V. 37. № 6. P. 481–490. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2004.01.002>