

# Особенности физического моделирования гидродинамики потока в конических подшипниках скольжения

С.Ф.Разави • А.Д. Коваль

КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина

Received: 11 February 2018 / Accepted: 09 March 2018

**Аннотация.** Исследование гидродинамики потока в конических подшипниках трения является в настоящее время одной из актуальных задач в машиностроении, так как подобного рода подшипники используются в качестве опорных устройств и получили широкое распространение в целом ряде механических и гидравлических систем, в частности, в турбинах, системах гидропривода и в автомобильной промышленности. Особенностью подобного рода подшипников является то, что они имеют более сложную, по сравнению с цилиндрическими, конструкцию и недостаточно полно изучена гидродинамика потока внутри этих устройств. К сожалению, теоретические исследования подобных задач в настоящее время не является полным и результаты таких исследований не всегда совпадают с экспериментальными данными. Учитывая это, возникает необходимость в проведении экспериментальных исследований с целью получения зависимостей момента трения в коническом подшипнике скольжения и величин на него влияющих, например, толщиной смазывающего слоя, реологических характеристик смазки и кривизны поверхности. Данная работа посвящена физическому моделированию конических подшипников трения с учетом реологических свойств смазочных материалов, то есть рассматриваются проблемы связанные с определением момента трения в коническом зазоре с учетом реологических особенностей смазки.

**Ключевые слова:** системы смазки; конический зазор; крутящий момент; вращающийся конус

## Введение

Одной из основных задач при анализе подшипников скольжения с коническими поверхностями, является задача гидродинамического поведения смазочного слоя в коническом зазоре. Актуальность данной проблемы связана с решением технических задач по использованию подобного рода подшипников в качестве опорных устройств в гидравлических турбинах, машинах и аппаратах, где наряду с качествами, присущими цилиндрическим подшипникам должны проявляться качества опорного устройства [1-7]. Достоинствами конических подшипников являются их малые габариты, по сравнению с цилиндрическими, и надежность в эксплуатации. Вместе с тем, одним из недостатков таких подшипников является сложность изготовления и до настоящего времени, слабая изученность поведения смазочных материалов в зазоре между коническими поверхностями [2]. Этим объясняется как актуальность данной проблемы, так и слабая изученность и недостаток теоретических и экспериментальных исследований в данной области.

Особенность гидродинамики в подобных подшипниках заключается в том, что течение происходит в зазоре между коническими поверхностями, кривизна которых меняется по длине, а следовательно, это существенно влияет на коэффициент гидравлического трения, что в свою очередь влияет на величину передаваемого крутящего момента.

Одним из актуальных вопросов при решении задач смазки в конических подшипниках трения, а точнее в зазорах между коническими поверхностями, которые вращаются с заданной угловой скоростью, является задача определение крутящего момента, возникающего в зависимости от реологических свойств смазочной среды. Причем, в качестве смазочных сред могут быть среды, которые обладают как вязкостными свойствами (при условии постоянства вязкости), так и проявлениями аномалий вязкости (т.е. неньютоновские жидкости). Анализ поведения таких жидкостных смазок, описанных в работах [3], показал, что в общем случае момент трения  $M$ , возникающий на конической поверхности, может рассматриваться как функция следующих физических величин [8]

$$M = f(h, \omega, R, \mu, \rho, N, p). \quad (1)$$

На основании  $\pi$ -теоремы можно показать, что данная величина в безразмерном виде может быть представлена зависящей от следующего комплекса безразмерных параметров

$$\frac{M}{\rho^{\alpha_1} \omega^{\beta_1} h^{\gamma_1}} = f \left( \frac{R}{\rho^{\alpha_2} \omega^{\beta_2} h^{\gamma_2}}; \frac{\mu}{\rho^{\alpha_3} \omega^{\beta_3} h^{\gamma_3}}; \frac{N}{\rho^{\alpha_4} \omega^{\beta_4} h^{\gamma_4}}; \frac{p}{\rho^{\alpha_5} \omega^{\beta_5} h^{\gamma_5}} \right), \quad (2)$$

де  $h$  - ширина щели (м),  $\omega$  - окружная скорость (м/с),  $R$  - радиус вращения цилиндра (м),  $\mu$  - коэффициент динамической вязкости (Па·с),  $\rho$  - плотность смазки (кг/м<sup>3</sup>),  $N$  - нагрузка (Н),  $p$  - давление (Па),  $M$  - крутящий момент (Н·м).

Как следует из анализа данной зависимости можно получить следующие критерии

$$\pi_1 = \frac{M}{\rho \omega^2 h^3}; \pi_2 = \frac{R}{h}; \pi_3 = \frac{\mu}{\rho \omega h}; \pi_4 = \frac{N}{\rho \omega^2 h^2}; \pi_5 = \frac{p}{\rho \omega^2}. \quad (3)$$

Соотношение между данными комплексами могут быть определены на основании проведенных экспериментальных исследований моделирующих работу подобного подшипника скольжения. Таким образом, в качестве основной характеристики для определения момента трения  $M$ , был выбран следующий комплекс

$$\frac{M}{\rho \omega^2 h^3} = f \left[ \frac{R}{h}; \frac{\mu}{\rho \omega h}; \frac{N}{\rho \omega^2 h^2}; \frac{p}{\rho \omega^2} \right]. \quad (4)$$

**Цель исследования.** Проведение физического моделирования работы конического подшипника скольжения с учетом влияния реологических свойств смазочных материалов и конструктивных особенностей подшипника, связанных с толщиной смазочного слоя и кривизной поверхности. Для достижения данной цели была спроектирована и изготовлена экспериментальная установка.

Для обобщения полученных результатов, в качестве модельных смазочных материалов использовались среды, реологическое поведение которых мы описали законом Оствальда де Вилля

$$\tau = k \dot{\gamma}^n,$$

где  $\tau$  - касательное напряжение, Па;  $k$  - коэффициент консистенции материала;  $\dot{\gamma}$  - скорость деформации, 1/с;  $n$  - индекс течения.

В качестве модельных жидкостей были выбраны моторные масла и трансмиссионные смазки от различных производителей. Было проведено изучение реологических характеристик выбранных жидкостей в диапазоне температур 20...100°C на ротационном вискозиметре Реотест-2.1. Изучение реологических характеристик проводилось с целью выявления аномалий вязкости и изучения влияния аномалий вязкости на особенности течения смазки в коническом зазоре.

Анализ результатов исследований показал, что моторное масло 10w-40 Лада-Люкс и трансмиссионное масло ТАД-17И, реологические характеристики которых представлены на рис.1, можно считать ньютоновскими жидкостями ( $n=1$ ).

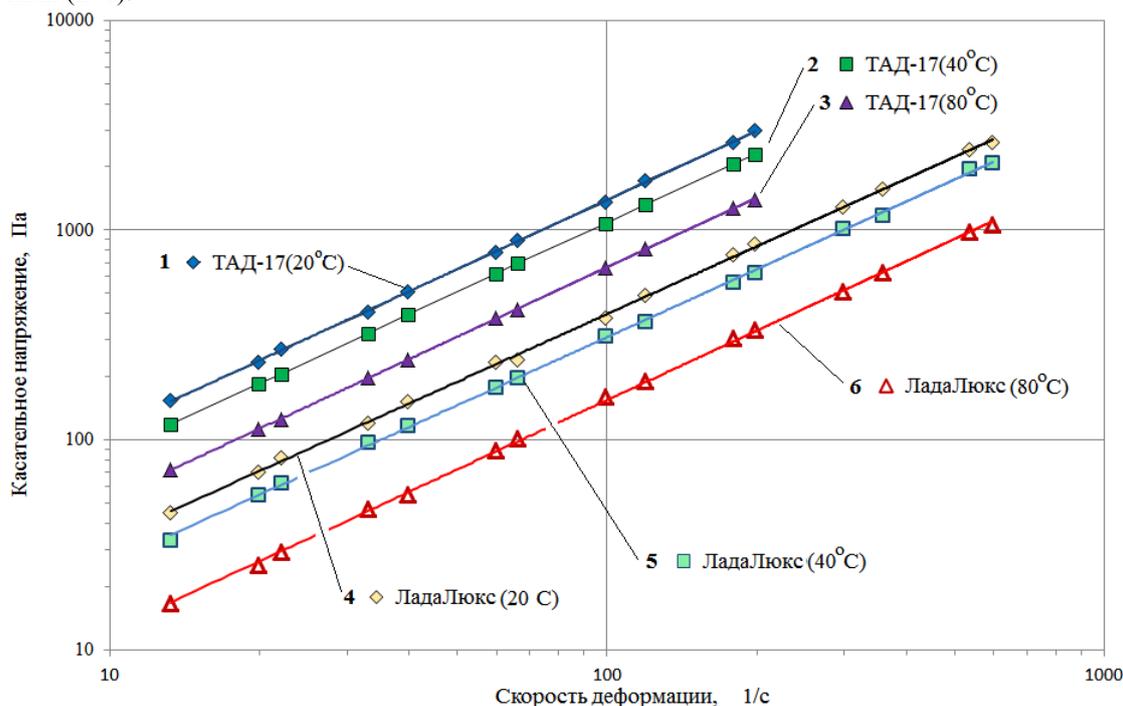


Рис. 1. Реологические кривые трансмиссионного масла ТАД-17И и моторного масла 10w-40 Лада-Люкс: 1 -  $n_{20}=1,0931$ , 2 -  $n_{40}=1,0961$ , 3 -  $n_{80}=1,0997$ , 4 -  $n_{20}=1,0704$ , 5 -  $n_{40}=1,074$ , 6 -  $n_{80}=1,0978$

Моторные масла Forsage 15w-40 и Grom-ex 15W40, реологические характеристики которых представлены на рис.2, дилатантными жидкостями ( $n > 1$ ). Следует отметить, что у масла Grom-ex 15W40 аномальные свойства выражены не так сильно и при высоких температурах ее можно считать ньютоновской жидкостью. Трансмиссионные смазки Литол-24 и Нигрол, реологические характеристики которых представлены на рис.3, обладают явно выраженными неньютоновскими свойствами ( $n < 1$ ).

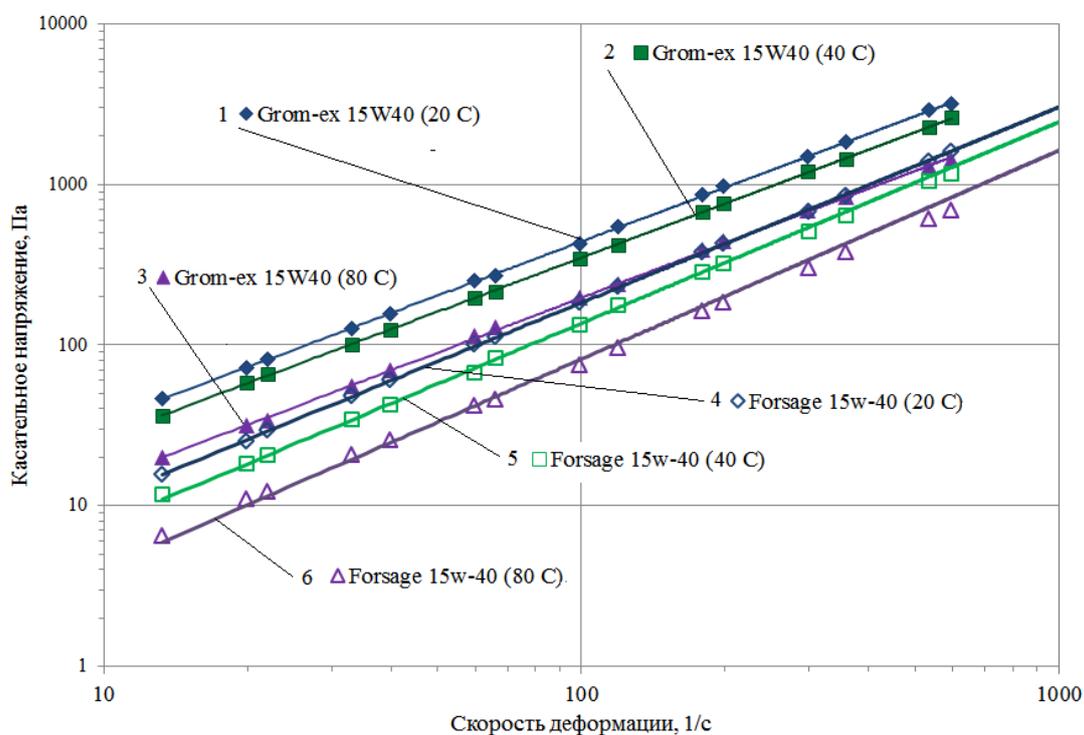


Рис. 2. Реологические кривые моторных масел Forsage SAE 15w-40 и Grom-ex 15W40:  
1–  $n_{20}=1,237$ , 2–  $n_{40}=1,2263$ , 3 –  $n_{80}=1,2261$ , 4–  $n_{20}=1,116$ , 5 –  $n_{40}=1,117$ , 6–  $n_{80}=1,079$

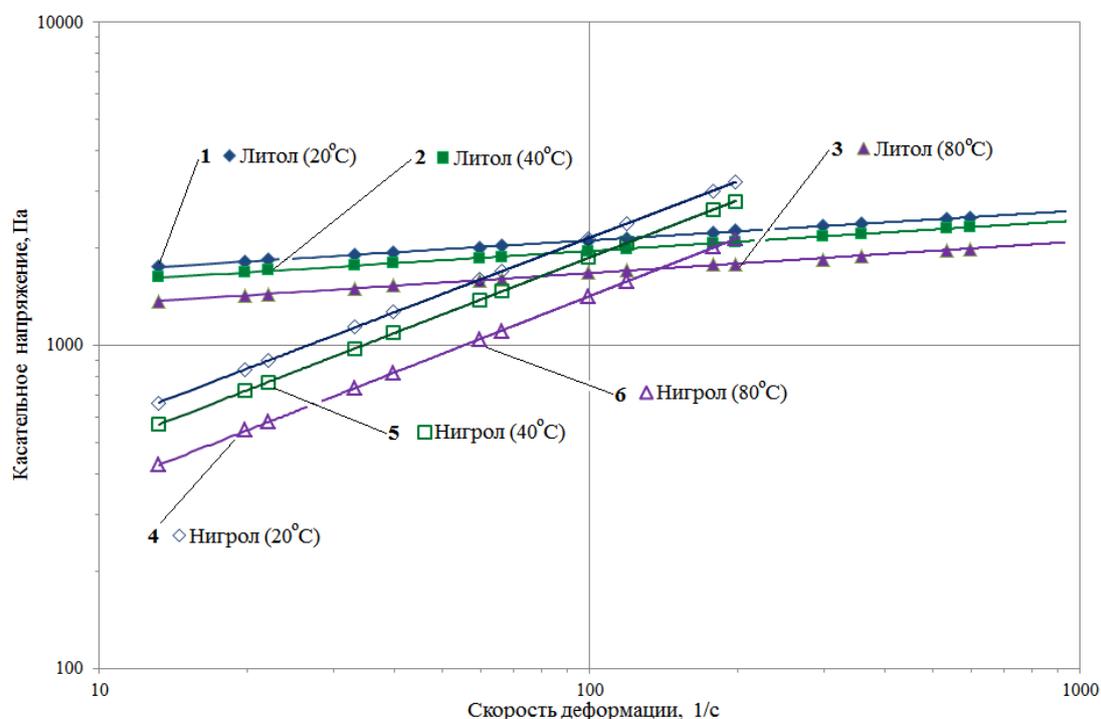


Рис. 3. Реологические кривые трансмиссионных смазок Литол-24 и Нигрол:  
1–  $n_{20}=0,0926$ , 2–  $n_{40}=0,0948$ , 3 –  $n_{80}=0,0983$ , 4–  $n_{20}=0,5797$ , 5 –  $n_{40}=0,5879$ , 6–  $n_{80}=0,5951$

Экспериментальные исследования крутящего момента проводилось на стенде, представляющем собой модернизированный ротационный вискозиметр Реотест-2 (рис.4), предназначенный для определения коэффициента динамической вязкости путем замера угла рассогласования между приводным и измерительным валом, которые соединены между собой пружиной, выполняющей функцию муфты и являющейся частью динамометра. Потенциометром измеряется это рассогласование и преобразуется в пропорциональный сигнал тока.

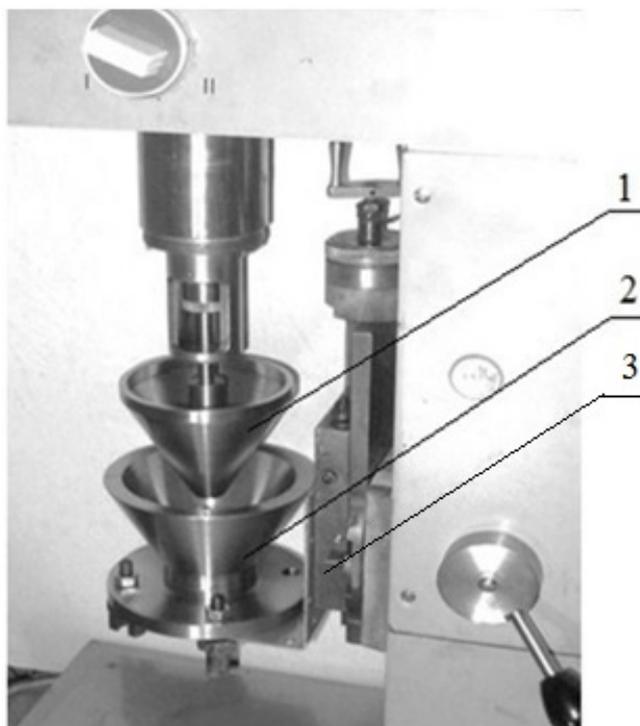


Рис. 4. Экспериментальный стенд: 1-подвижная внутренняя коническая поверхность, 2-неподвижная внешняя коническая поверхность, 3-устройство для изменения величины щелевого зазора

В модернизированном вискозиметре были заменены пружинные муфты, а в качестве рабочих элементов, использовались специально разработанные для серии экспериментов конические поверхности различных размеров, моделирующие конический подшипник скольжения [9].

Использование вискозиметра с конической частью позволило определить крутящий момент прибора или момент трения, возникающий при вращении внутреннего цилиндра с достаточной степенью точности.

В результате проведенного эксперимента были получены данные о зависимости крутящего момента смазочного материала от частоты вращения, толщины смазочного слоя, степени конусности рабочих поверхностей. Используя различные смазочные материалы, обладающими различными реологическими свойствами, был проведен анализ влияния вязкости на момент трения при фиксированных значениях толщины смазочного слоя, температуры и особенности поверхности контакта.

На рис.5 представлены примеры этих зависимостей для ТАД-17И, реологические свойства которого близки к ньютоновским, моторного масла Grom-eh 15W40 и смазки Нигрол, проявляющих аномалии вязкости. Эти жидкости представлены в качестве модельных, так как было сделано предположение, что аномалии вязкости не влияют на характер течения подобных жидкостей в коническом зазоре, при вращении внутреннего конуса.

Кривые представлены в безразмерном виде, где принято  $\bar{M} = \frac{M}{M_0}$  и  $\bar{\mu} = \frac{\mu}{\mu_0}$ , при условии, что значения

$M_0$  и  $\mu_0$  определены при минимальных значениях крутящего момента.

Как видно из представленных графиков (рис.5), полученных для фиксированных значений толщины смазочного слоя  $h=0,4$  мм (значительно превышающего величину выступов шероховатости) приведенные соотношения носят нелинейный характер (особенно для моторного масла “Grom-eh 15W40”, которое является неньютоновской жидкостью с индексом течения  $n_{20}=1,237$ ).

В первом приближении данные зависимости могут быть описаны соотношением

$$\bar{M} = \bar{M}_0 + A\bar{\mu}^2,$$

где  $M_0$  – минимальное значение момента при  $\bar{\mu} = \bar{\mu}_0$ ,  $A=f(h)$  – постоянная зависящая от толщины слоя смазки.

Как следует из выражения (4), момент трения зависит и от толщины смазочного слоя. Зависимость момента трения от толщины слоя смазки, т.е.  $M=f(h)$ , в безразмерном виде будет характеризоваться комплексом

$$\frac{M}{\rho \omega^2 h^3} = f \left[ \frac{\mu}{\rho \omega h} \right],$$

который, в данном случае, является определяющим, при фиксированном значении остальных

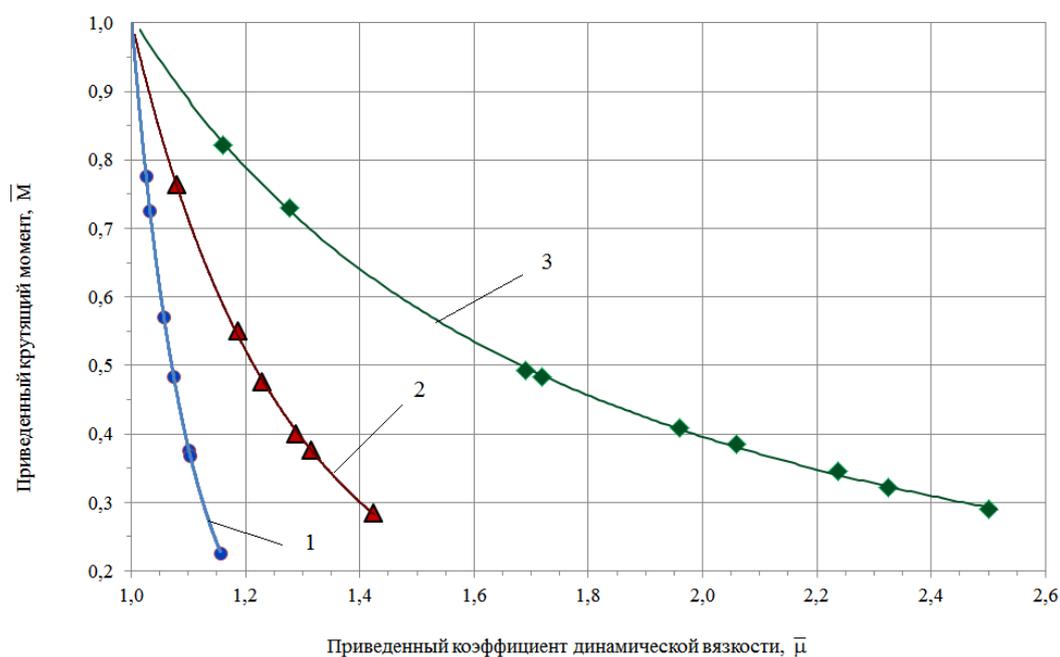


Рис. 5. Зависимость приведенного крутящего момента от приведенного коэффициента динамической вязкости при ширине щелевого зазора  $h=0,4$  мм: 1- Нигрол; 2- ТАД17И; 3 - Grom-ex 15W40

Для выяснения характера изменения момента трения в зависимости от толщины смазочного слоя были проведены экспериментальные исследования и построены соответствующие зависимости.

На рис. 6 и рис.7 представлены примеры этих зависимостей для двух типов масел с различными реологическими характеристиками, для момента трения  $M$  как функции ширины щелевого зазора  $h$ , т.е.  $M=f(h)$ .

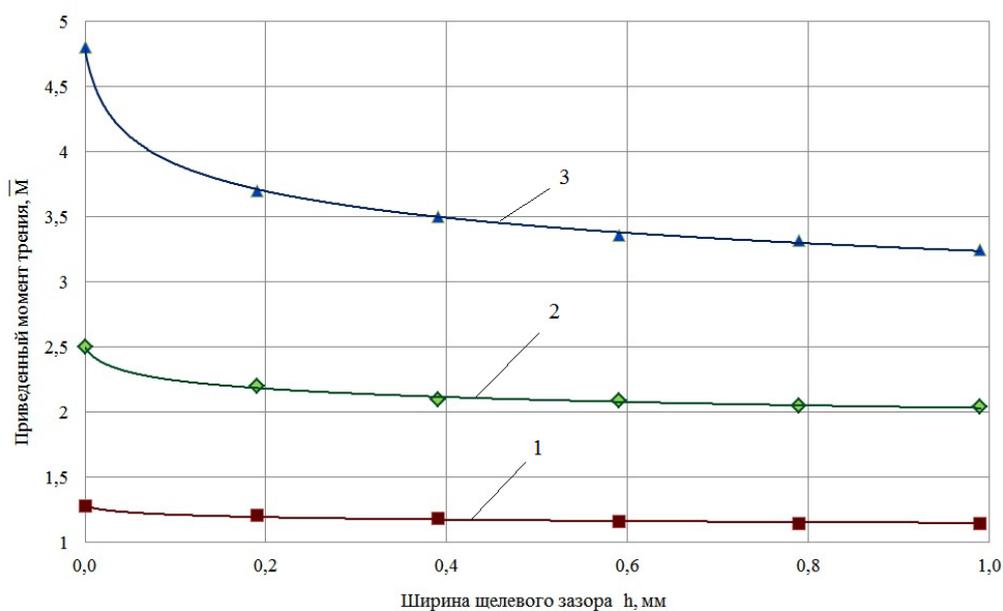


Рис. 6. Зависимость приведенного момента трения от ширины щелевого зазора для масла “ТАД-17И” при различных частотах вращения: 1- 3 об/мин; 2- 7 об/мин; 3- 14 об/мин

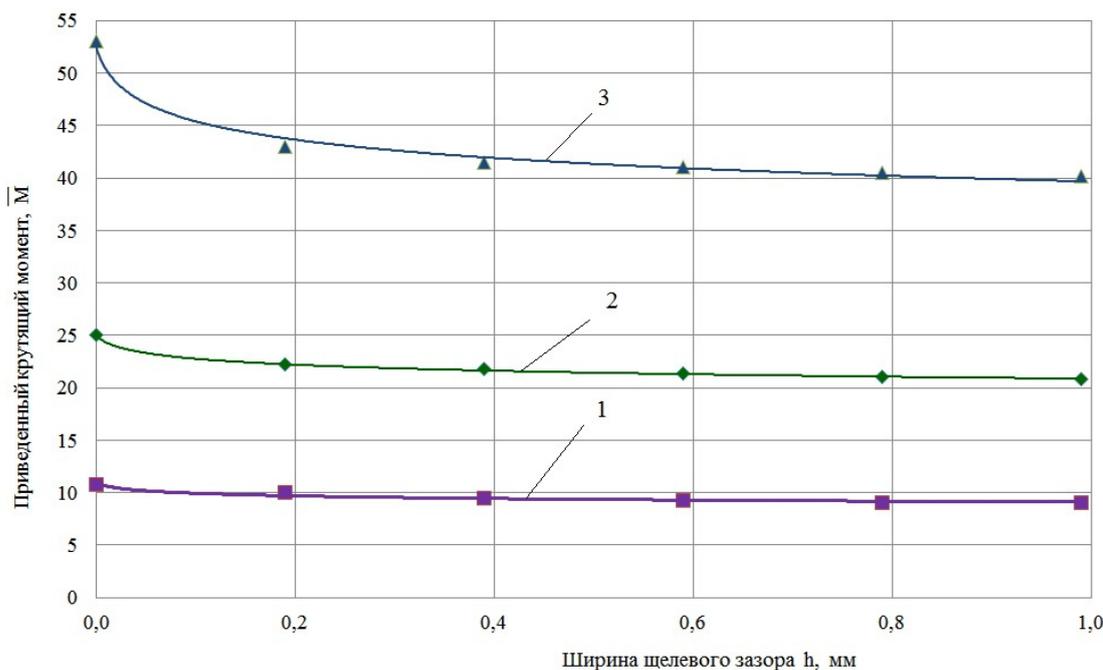


Рис. 7. Зависимость приведенного момента трения от ширины щелевого зазора для смазки Нигрол при различных частотах вращения: 1- 3 об/мин; 2- 9 об/мин; 3- 21 об/мин

Как видно из данных графиков (рис.6, рис.7) при достаточно больших значениях толщины смазочного слоя, приведенный момент трения от величины смазочного слоя  $h$  не зависит и можно считать его величину постоянной, о чем свидетельствует часть графика - автомодельная область, где кривые параллельны горизонтальной оси. Данные графики имеют одинаковый характер как для ньютоновской жидкости ТАД-17И так и для неньютоновской Нигрол.

#### Выводы

В настоящей работе представлены результаты исследований, посвященных изучению влияния реологических свойств жидкости и толщины смазывающего слоя на момент трения, возникающего при вращении внутренней конической поверхности, относительно внешней.

В качестве рабочих жидкостей использовались моторные масла и трансмиссионные смазки, обладающие различными реологическими свойствами и, как показали эксперименты, являющимися как к ньютоновским так и к неньютоновским (вязкопластичным и дилатантным) средами.

Анализ полученных зависимостей позволил сделать вывод, что используемые смазочные материалы с достаточной степенью достоверности могут быть описаны реологическим законом Оствальда де Вилля. Полученные данные экспериментальных исследований, представленные в данной статье, указывают на нелинейный характер зависимости момента трения от вязкости и толщины смазочного слоя. Критериальная обработка данных результатов на основании  $\pi$ -теоремы дает возможность осуществить анализ полученных экспериментальных данных в виде безразмерных комплексов. Подобного рода исследования для зазоров между коническими поверхностями указывают на существенное отличие величины момента трения в подшипниках скольжения с конической поверхностью трения по сравнению моментом трения в подшипниках скольжения с цилиндрической поверхностью трения.

Результаты, представленные в статье, могут быть положены в основу дальнейших исследований по повышению эффективности эксплуатации конических поверхностей скольжения.

## Peculiarities of physical modeling of hydrodynamics of flow in conical slide bearings

F. Razavi, O. Koval

**Abstract.** Studying of hydrodynamics flow in conical friction bearings is one of the actual tasks in mechanical engineering. Such kinds of bearings are used as support devices and have been widely used in a number of mechanical and hydraulic systems, particularly in turbines, hydraulic drive systems and in the automotive industry. The feature of such kind of bearings is that they have more complex

construction than cylindrical ones. Also hydrodynamics of the flow inside these devices has not been fully studied. Unfortunately, theoretical studies of such problems are not complete at present time and the results of such studies do not always coincide with the experimental data. Considering this, it becomes necessary to carry out experimental studies to obtain friction torque dependencies in a conical sliding bearing and the magnitudes affecting it, for example, the thickness of the grease layer, the rheological characteristics of the grease and the curvature of the surface. This work is devoted to the physical modeling of friction conical bearings with taking into account the rheological properties of grease.

*Keywords:* lubrication systems; conical clearance; torque; rotating cone

## Особливості фізичного моделювання гідродинаміки потоку в конічних підшипниках ковзання

Ф. Разаві, О. Коваль

**Анотація.** Дослідження гідродинаміки потоку в конічних підшипниках тертя є в даний час одним із актуальних завдань в машинобудуванні, так як подібного роду підшипники використовуються в якості опорних пристроїв і набули поширення в цілому ряді механічних і гідравлічних систем, зокрема, в турбінах, системах гідроприводу та в автомобільній промисловості. Особливістю конічних підшипників тертя є те, що вони мають більш складну, в порівнянні з циліндричними, конструкцію і недостатньо повно вивчена гідродинаміка потоку всередині цих пристроїв. На жаль, теоретичні дослідження подібних задач в наш час не є повними і результати таких досліджень не завжди збігаються з експериментальними даними. Отже виникає необхідність в проведенні експериментальних досліджень з метою отримання залежності моменту тертя в конічному підшипнику ковзання і величин, які на нього впливають, наприклад, товщини змащувального шару, реологічних характеристик мастила і кривизни поверхні. Дана робота присвячена фізичному моделюванню конічних підшипників тертя з урахуванням реологічних властивостей мастильних матеріалів.

**Ключові слова:** системи змащення; конічний зазор; обертаючий момент; конус, що обертається

### References

1. Воскресенский, В.А. Расчёт и проектирование опор скольжения (жидкостная смазка) / В.А. Воскресенский, В.И. Дьяков. -М.: Машиностроение, 1980. - 224 с.
2. Виноградов Г.В. Ротационные приборы. Измерение вязкости и физико - механических характеристик материалов / И.М. Белкин, Г.В. Виноградов, А.И. Леонов; под ред. Г.В. Виноградова. -М.: Машиностроение, 1968. - 272 с. : ил.
3. On the influence of lubricant on the dynamics of two-dimensional journal bearings / X.K. Li, D.Rh. Gwynllwy, A.R. Davies, T.N. Phillips//J. Non-Newtonian Fluid Mech. - 2000. - V. 93. № 1. - P. 29-59. doi.org/10.1016/S0377-0257(00)00107-5
4. Paranjpe, R.S. Analysis of Non-Newtonian Effects in Dynamically Loaded Finite Journal Bearings Including Mass Conserving Cavitation / R.S. Paranjpe // Trans ASME Jour of Trib. - 1992. -V.114. № 4. - P. 736-746, doi:10.1115/1.2920943
5. Gecim, B.A. Non-Newtonian Effect of Multigrade Oils on Journal Bearing Perfomance / B.A. Gecim // Tribology Transaction. - 1990. -Vol.3. - P. 384-394. doi.org/10.1080/10402009008981968
6. Garg H. C Thermohydrostatic analysis of capillary compensated symmetric hole-entry hybrid journal bearing operating with non-Newtonian lubricant/H.C. Garg, V. Kumar, H.B. Sharda /Industrial Lubrication and Tribology. - 2009. - V. 61, № 1. - P. 11-21.
7. Тарг С.М. Основные задачи теории ламинарных течений / С.М.Тарг. – Л.;М. : Гостехтеориздат, 1951 . – 420 с.
8. Гухман А.А. Введение в теорию подобия / А.А.Гухман, 2-е изд. — М.: Высшая школа, 1973. — 296 с.
9. Коваль А.Д., Ногин Н.В., Разави С.Ф. Определение крутящего момента в системах смазки с коническим зазором. Вісник НТУУ "КПІ". Серія машинобудування. – 2016. - Том 3, № 78. - с. 41-45, DOI: <https://doi.org/10.20535/2305-9001.2016.78.79011>