

Краснов И. М., Григорьева А. Л.

I. M. Krasnov, A. L. Grigorieva

**К ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЧАСТИЧНО-ПОРИСТОГО КОНУСНОГО ГАЗОСТАТИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА**

**ON THE PROBLEM OF DETERMINING THE STATIONARY CHARACTERISTICS
OF A PARTIALLY POROUS CONICAL GAS-STATIC BEARING**

Краснов Игорь Михайлович – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Krasnov_im@mail.ru.

Igor M. Krasnov – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Krasnov_im@mail.ru.

Григорьева Анна Леонидовна – кандидат физико-математических наук, доцент, зав. кафедрой «Прикладная математика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: naj198282@mail.ru.

Anna L. Grigorieva – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Applied Mathematics, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: naj198282@mail.ru.

Аннотация. В работе рассмотрена задача математического моделирования, используемая для определения характеристик конусных частично-пористых газостатических подшипников, имеющих стационарный характер. На основе решения совокупной системы уравнений математической модели получено модифицированное уравнение Рейнольдса для определения поля давления в зазоре рассматриваемой конусной опоры.

Summary. The paper considers the problem of mathematical modeling used to determine the characteristics of cone partially-porous gas-static bearings having a stationary character. Based on the solution of the total system of equations of the mathematical model, a modified Reynolds equation is obtained for determining the pressure field in the gap of the cone bearing under consideration.

Ключевые слова: математическая модель, давление газа, математический алгоритм, подшипники, газостатические подшипники, конусные подшипники.

Key words: mathematical model, gas pressure, mathematical algorithm, calculation model, bearings, gas-static bearings, cone bearings.

УДК 621.822.174

Введение. Бурный рост промышленности, связанный с активной цифровизацией в сфере высоких технологий, определяет, в частности, потребность в более скоростной работе многих устройств: станочного оборудования, газотурбинных установок, детандеров и т. д. В связи с этим возникает потребность в совершенствовании процесса функционирования отдельных узлов оборудования. Одним из таких важных элементов машин и механизмов является подшипниковый узел, надёжная и эффективная работа которого во многом определяет параметрическую надёжность оборудования в целом.

В промышленных конструкциях (в зависимости от области применения) используются различные типы подшипников, которые классифицируют на опоры качения и скольжения. Остановимся на рассмотрении опор скольжения, поскольку в основном они позволяют роторам устройств достигать высоких скоростей вращения. Подшипник скольжения – это опора или направляющая машины и механизма, в которой трение происходит при скольжении сопряжённых поверхностей. К подшипникам скольжения относят: газостатические и газодинамические опоры, гидростатические и гидродинамические подшипники, а также магнитные и газоманитные опоры.

Радиальный подшипник скольжения размещается в корпусе, в который устанавливается рабочий элемент – вкладыш подшипника или втулка из антифрикционного материала. Зазор, который имеется между валом и вкладышем, заполняется специальным смазочным материалом. Смазочный материал даёт валу возможность свободно вращаться. Для определения величины зазора подшипника, работающего в режиме разделения поверхностей трения смазочным слоем, используются формулы из гидродинамической теории смазки. Основной задачей при определении стационарных характеристик подшипников скольжения становится определение поля давления смазки в зазоре опоры [1]. Информация о распределении давления позволяет без труда определить несущую способность подшипника, жёсткость смазочного слоя, расход смазочного материала и момент от перекаса оси вала.

Трение скольжения, возникающее при эксплуатации подшипника, может быть сухим, граничным, жидкостным и газодинамическим. Малое значение трения обеспечивается наличием смазки, это является одним из основных условий надёжной работы подшипника. С помощью смазки происходит функционирование различных частей подшипника, а также теплоотвод, защита от вредного воздействия окружающей среды и т. д. [2].

Выделяют различные виды смазки, которые определяются её состоянием:

- жидкая (минеральные и синтетические масла, вода для неметаллических подшипников);
- пластичная (на основе литиевого мыла и сульфоната кальция и др.);
- твёрдая (графит, дисульфид молибдена и др.);
- газообразная (воздух, различные инертные газы, азот и др.).

Также подшипники скольжения разделяют на контактные и бесконтактные. В табл. 1 показаны преимущества и недостатки контактных и бесконтактных опор [7–8].

Таблица 1

Сравнительные характеристики подшипников различного типа

Тип подшипника	Плюсы	Минусы
Контактные	Высокая грузоподъёмность	Высокий уровень трения и износа
	Надёжное удержание смазки	Более высокий уровень вибрации и шума
	Хорошая устойчивость к ударным нагрузкам	Требуется регулярное техническое обслуживание
		Более сложная конструкция
Бесконтактные	Низкий уровень трения	Ограниченная грузоподъёмность
	Более длительный срок службы	Менее надёжное удержание смазки (гидростатические)
	Низкий уровень вибрации и шума	Чувствительность к загрязнениям
	Обеспечивается высокая скорость вращения вала	Могут требовать более тщательной установки
	Простота конструкции	Меньшая устойчивость к ударным нагрузкам

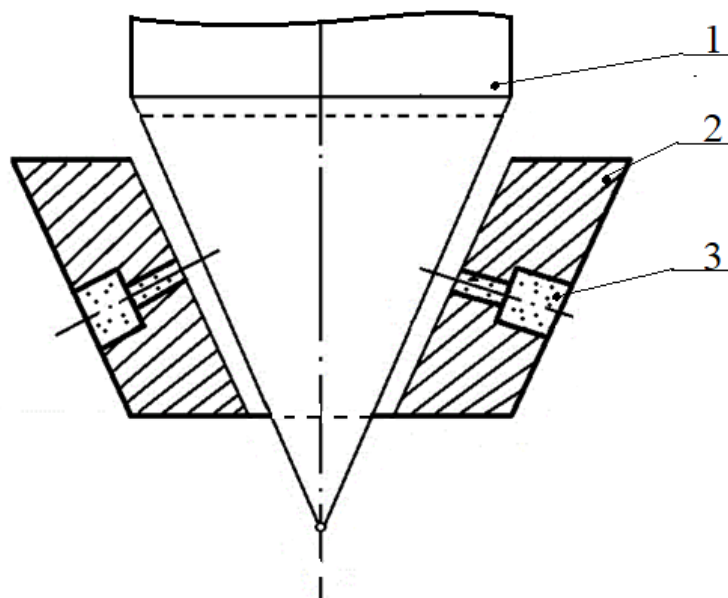
Из представленных в табл. 1 данных видно, что бесконтактные подшипники обладают рядом уникальных характеристик, которые делают их незаменимыми при определённых условиях эксплуатации. Особенно это касается областей промышленности, где минимизация трения и вибраций имеет критическое значение. Одним из часто используемых в промышленности видов бесконтактных подшипников являются газостатические опоры, которые используют внешнее нагнетание газа в зазор для создания своей несущей способности (грузоподъёмности).

Газостатические подшипники, в отличие от контактных, обеспечивают почти идеальные условия для высокоскоростных и высокоточных приложений. Их применение особенно важно там, где даже малейшие вибрации или тепловыделения могут негативно сказаться на работе оборудования [2].

Газостатические подшипники в зависимости от воспринимаемой нагрузки делятся на цилиндрические, упорные, конические и сферические.

В Комсомольском-на-Амуре государственном университете выполнен широкий круг теоретических и экспериментальных исследований частично-пористых цилиндрических газостатических подшипников [3–5]. Комплекс экспериментов показал неоспоримые преимущества частично-пористых опор по сравнению с другими видами газовых подшипников, имеющими иной тип ограничителей расхода газа. Преимущества частично-пористых опор чётко проявляются при высокой частоте вращения ротора [6].

Характеристики конических газостатических подшипников с частично-пористой поверхностью вкладыша (см. рис. 1), в отличие от цилиндрических, к настоящему времени остаются практически не исследованы. Между тем внедрение в конструкцию высокоскоростных устройств конусных опор позволяет существенно упростить конструкцию подшипниковых узлов машин и механизмов, используемых в автомобильной и железнодорожной промышленности, в сельскохозяйственной технике, строительной, аэрокосмической и горнодобывающей промышленности, а также в полупроводниковой и текстильной промышленности [7–12].



1 – вал; 2 – вкладыш; 3 – пористая вставка

Рис. 1. Конический газостатический подшипник с частично-пористой поверхностью вкладыша

В целом, исследованиями, связанными с изучением конусных газостатических подшипников, занимаются Й. Ларссон [13], Ван Хуэй [14], Ф. Каstellини [15], М. Ф. Ахмед [16] и др.

Математическая модель для определения стационарных характеристик частично-пористого газостатического подшипника содержит дифференциальные уравнения в частных производных, составляющих систему, которая имеет вид [17]:

- уравнения политропы $\frac{p}{\rho^n} = \text{const}$;
- уравнения неразрывности $\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \text{div}(\rho V) = 0$;
- уравнения движения $\rho \frac{dV}{d\tau} = \rho \bar{f} - \text{grad } p + 2 \text{div}(\mu E) - \frac{2}{3} \text{grad}(\mu \text{div} V)$;
- уравнения энергии $\rho \frac{d}{d\tau}(c_p T) = \frac{\partial Q}{\partial \tau} + \frac{dp}{d\tau} + \text{div}(\chi_t \text{grad } T) + \Phi$,

где p – давление в слое жидкости; ρ – плотность газа; μ – динамическая вязкость жидкости; τ – время; V – скорость газа; $\bar{f}$ – внешняя сила, отнесённая к единице массы газа; E – тензор скоростей деформации; c_p – удельная теплоёмкость при постоянном давлении; Q – внутренняя теплота; χ_t – коэффициент теплопроводности; Φ – диссипативная функция, которая равна

$$\Phi = 2\mu \left[\left(\frac{dV_x}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dV_y}{dy} \right)^2 + \left(\frac{dV_z}{dz} \right)^2 \right] + \mu \left[\left(\frac{dV_x}{dy} + \frac{dV_y}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dV_y}{dz} + \frac{dV_z}{dy} \right)^2 + \left(\frac{dV_z}{dx} + \frac{dV_x}{dz} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \mu (\operatorname{div} V)^2.$$

Для определения величины поля давления, возникающего в зазоре цилиндрической частично-пористой газостатической цапфы, применялся подход из работ [6] и [17]. В связи с чем, используя полученные выше выводы, можно утверждать, что, применяя сферическую систему координат для уравнения неразрывности из приведённой выше системы дифференциальных уравнений в частных производных, можно получить уравнение, позволяющее определить давление газа в зазоре конической частично-пористой газостатической опоры. Данное уравнение представлено в виде модифицированного уравнения Рейнольдса, которое имеет вид

$$rr \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{h^3}{\mu} rr \frac{\partial p^2}{\partial rr} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p^2}{\partial \varphi} \right) = \\ = \frac{12 \cdot k_p \cdot (p_s^2 - p^2) \cdot ff}{\delta^2 \mu} + 12V \cos \varphi \cdot \sin \theta \frac{\partial(ph)}{\partial r} + \frac{\sin \varphi}{r \cdot \sin \theta} \frac{\partial(ph)}{\partial \varphi},$$

где rr – радиус-вектор сферической системы координат; φ – азимутальный угол; ff – специальный коэффициент, позволяющий разбить область интегрирования на части в зависимости от материала области, в данном случае коэффициент может принимать значения: 1 – при исследовании области пористых вставок, 0 – области вне пористых вставок; h – толщина газового слоя, зависящая от углов θ (полярный угол) и φ ; θ – угол конусности; p_s – давление надува газа.

В дальнейших исследованиях представленное уравнение Рейнольдса будет решаться численным способом – методом конечных разностей.

Заключение. Детальное исследование особенностей характеристик конусных газостатических подшипников, воспринимающих опорно-упорные нагрузки, открывает широкую возможность не только их надёжного внедрения в конструкции высокоскоростных роторных систем с целью удешевления устройств, но и регулировки значения среднего радиального зазора, поскольку он, как показывают многочисленные исследования, весьма сильно влияет на значения характеристик подшипника. Это, в частности, является предметом дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Червинский, Н. М. Основы трибологии / Н. М. Червинский, В. Л. Червинский. – М.: Лань, 2011. – 288 с.
2. Морозов, Л. А. Подшипники в машинах и установках / Л. А. Морозов, В. В. Недорубов. – М.: Машиностроение, 2010. – 448 с.
3. Ваньков, А. А. Описание динамики высокоскоростного ротора / А. А. Ваньков, В. С. Щетинин, А. В. Космынин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – № I-1 (33). – С. 76-79.
4. Космынин, А. В. Методики определения влияния режимных и конструктивных параметров на траекторию движения ротора на газостатических опорах / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, А. А. Ваньков // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № I-1 (25). – С. 48-52.

5. О теории газовой смазки и одной её задаче / А. В. Космынин, А. С. Хвостиков, В. С. Щетинин, А. В. Смирнов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № III-1 (43). – С. 94-98.
6. Шпиндельные узлы металлорежущих станков на опорах с внешним надувом газа для финишной обработки отверстий малого диаметра / В. С. Щетинин, А. В. Космынин, А. В. Ульянов, А. А. Ваньков // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2-19. – С. 4192-4196.
7. Паршаков, В. Н. Подшипники скольжения / В. Н. Паршаков, Ю. Г. Коротков. – М.: Машиностроение, 2005. – 360 с.
8. Справочник инженера-конструктора. Машиностроение / под ред. И. Ф. Платонова. – М.: Машиностроение, 2004. – 1032 с.
9. Гондин, Ю. Н. Внутршлифовальный станок с головкой на подшипниках с воздушной смазкой / Ю. Н. Гондин, Л. И. Вильк // Станки и инструменты. – 1970. – № 8. – С. 14-15.
10. Андреев, В. И. Техническая трибология / В. И. Андреев. – М.: Высш. шк., 2008. – 360 с.
11. Мартынов, Г. М. Трибология и смазка технологического оборудования / Г. М. Мартынов, В. Н. Корнев. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 368 с.
12. Трибология: учеб. для вузов / под ред. А. А. Берещенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 528 с.
13. Larsson. Non-equilibrium wall-bounded turbulent flows at high Reynolds numbers // U. S. National Science Foundation. – URL: https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=1453633.
14. Обзор анализа трибологических отказов и исследований технологии смазки подшипников ветроэнергетики / Хан Пэн, Хай Чжан, Линьцзянь Шангуань, Йиса Фань // 1996-2024 MDPI. – URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/15/3041> (дата обращения: 12.03.2024). – Текст: электронный.
15. Сяндую, П. Технологии подшипников с длительным сроком службы по материальному аспекту: доклад конференции / П. Сяндую, Я. Шимизу, Н. Митамура // 2024 Springer Nature. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-03653-8_319 (дата обращения: 12.03.2024). – Текст: электронный.
16. Разработка и реализация операционной стратегии на основе искусственного интеллекта для снижения вибрации подшипника вала сверхкритической паровой турбины / В. М. Ашраф, Я. Рафик, Г. М. Уддин, Ф. Риаз, М. Асим, М. Фарук, А. Хуссейн, Ч. А. Салман // Alexandria Engineering Journal. – 2022. – Vol. 61, Issue 3. – P. 1864-1880. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016821005093> (дата обращения: 12.03.2024). – Текст: электронный.
17. Константиnescу, В. Н. Газовая смазка / В. Н. Константиnescу. – М.: Машиностроение, 1968. – 718 с.