

УДК 621.822.1

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГО-ДЕМПФЕРНОГО ПОДВЕСА ИЗ МАТЕРИАЛА МР ДЛЯ ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ

©2014 Е.Ф. Паровой, Ф.В. Паровой

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

В работе рассматривается методика расчёта характеристик сегментных гидродинамических подшипников нового типа. Конструкция таких подшипников обладает рядом преимуществ как в сравнении с подшипниками качения, так и с традиционными гидродинамическими подшипниками. Для создания эффективных опор на рассматриваемых подшипниках требуется разработка их методики проектирования, основанной на математическом аппарате и использовании современных САЕ-пакетов. В статье рассматриваются математические модели поведения системы "рабочий зазор - вкладыш подшипника - упругий подвес", разработанные для определения характеристик материала упругого подвеса вкладышей малорасходного сегментного подшипника скольжения, обеспечивающих оптимальный режим работы подшипника. На основе результатов программных CFD-расчётов характеристик течения смазки (распределение давлений по зазору, потребная величина деформации) с помощью математической модели возможно определить потребный диаметр проволоки материала упругого подвеса и плотность материала металлорезина.

Вкладыш, деформация, диаметр проволоки, математическая модель, металлорезина, нагрузка, рабочие характеристики.

Введение

Эффективность создания опорных узлов современных турбомашин, в том числе опор скольжения, во многом зависит от методов их проектирования. Однако, годами отработанные традиционные методики и расчётные модели могут оказаться неприменимыми для подшипников скольжения принципиально новых конструкций, таких, как малорасходные подшипники скольжения с упругим подвесом вкладышей, способных воспринимать высокие скорости, обладающих повышенным ресурсом, экономичностью и обеспечивающих динамическую устойчивость роторов газотурбинных двигателей (ГТД). Конструкция подшипника представлена на рис. 1, где 1 - подвкладышный слой металлорезины (МР), выступающий в роли упругого подвеса для силового замыкания рабочего зазора (принудительное нагружение всех вкладышей подшипника предотвращает возникновение "колодочного флаттера"); 2 - вкладыши подшипника, расточенные в радиус вала. Данная особенность обеспечивает практически мгновенный

"выход на клин", исключая режим граничного трения и тем самым повышая ресурсные характеристики подшипника. Работа подшипника осуществляется в режиме гидродинамической смазки. Смазка (масло, вода) подводится в область рабочего зазора через маслораздаточную канавку (3, рис. 1), после чего приводится в движение поверхностью вращающегося вала. За счёт поля отрицательных давлений, возникающих на передней кромке рабочего вкладыша, смазка "самозакачивается" в рабочий зазор.

При проектировании перспективных сегментных подшипников скольжения одним из важнейших этапов расчётных работ является этап определения и оптимизации характеристик упруго-демпферного подвеса вкладышей. В данной статье описаны разработанные математические модели описания поведения системы "рабочий зазор - вкладыш - МР", созданные с целью определения характеристик материала упругого подвеса, обеспечивающих оптимальный режим работы подшипника.

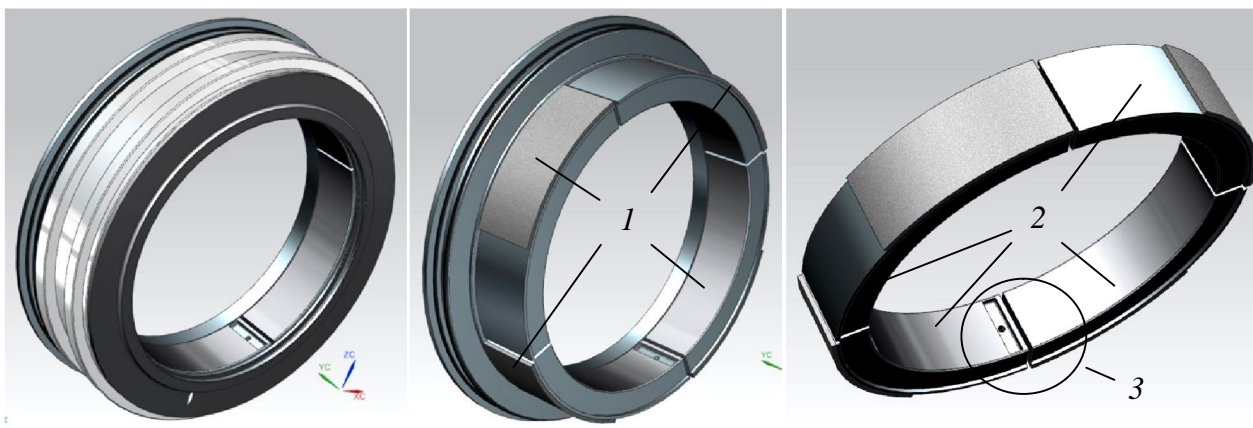


Рис. 1. Сегментный подшипник с упругим подвесом вкладышей на металлорезине

К настоящему времени накоплен значительный аналитическо-экспериментальный материал и практический опыт по моделированию работы материала МР. Однако, для эффективного расчёта описанной системы необходимо создание конечно-элементной модели материала МР, что представляет некоторые сложности ввиду того, что разработка даже самых простых физических моделей деформирования материала МР требует проведения экспериментальных работ и появления в расчётных зависимостях экспериментальных формул, направленных, в первую очередь, на достижение адекватности создаваемых моделей. Для решения поставленных задач можно воспользоваться работами [1, 2]. Созданная таким образом комплексная модель системы «рабочий зазор – вкладыш – МР» позволит решать сопряжённые задачи гидродинамики, теплового анализа и деформирования.

Механизм действия упругого подвеса вкладышей подшипника. Материал упругого подвеса позволяет вкладышам поворачиваться в радиальном направлении во время работы подшипника и занимать оптимальное рабочее положение. Слой материала МР сминается под действием сил давления смазки, возникающих в рабочем зазоре подшипника, и тем самым обеспечивает поворот вкладышей. При раскрутке вала начинает реализовываться характерный вид эпюры давлений (рис. 2, рабочее положение), обусловленный течением смазки по сужающемуся зазору.

Возникшая сила давит на вкладыш подшипника, от возникающих в зазоре нагрузок материал упругого подвеса деформируется, вызывая поворот вкладыша на угол δ_v .

На рис. 2 показана схема формирования моментов сил, возникающих в подшипнике с упругим подвесом вкладышей. Для определения деформационных характеристик вкладыша и материала упругого подвеса требуется отыскание точки приложения равнодействующей сил, возникающих в системе.

Определение точки приложения равнодействующей сил, действующих в системе "рабочий зазор – вкладыш – упругий подвес". Рис. 3 иллюстрирует алгоритм нахождения координаты точки приложения равнодействующей сил давления в МР. Определение значений оптимальных нагрузок в системе производится по результатам программного расчёта характеристик течения смазки (ANSYS CFX) в виде эпюры распределения полного давления по длине рабочего зазора. Условием баланса системы является тождественность нагрузки N и силы реакции МР P_{MP} (1):

$$N = -P_{MP} \quad (1)$$

Таким образом, следует математически описать положение равнодействующей сил реакций, возникающих в упругом подвесе P_{MP} , которая пропорциональна значению прикладываемой нагрузки, заданной в виде её распределения P_i .

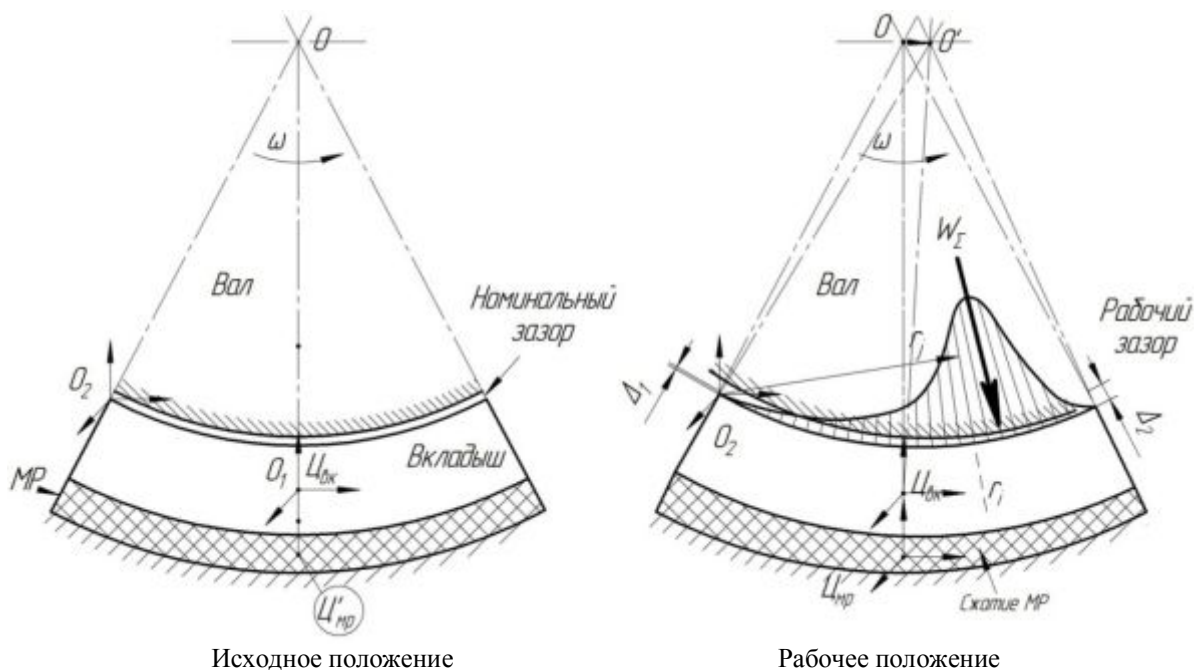


Рис. 2. Формирование момента и силы давления в рабочем зазоре подшипника

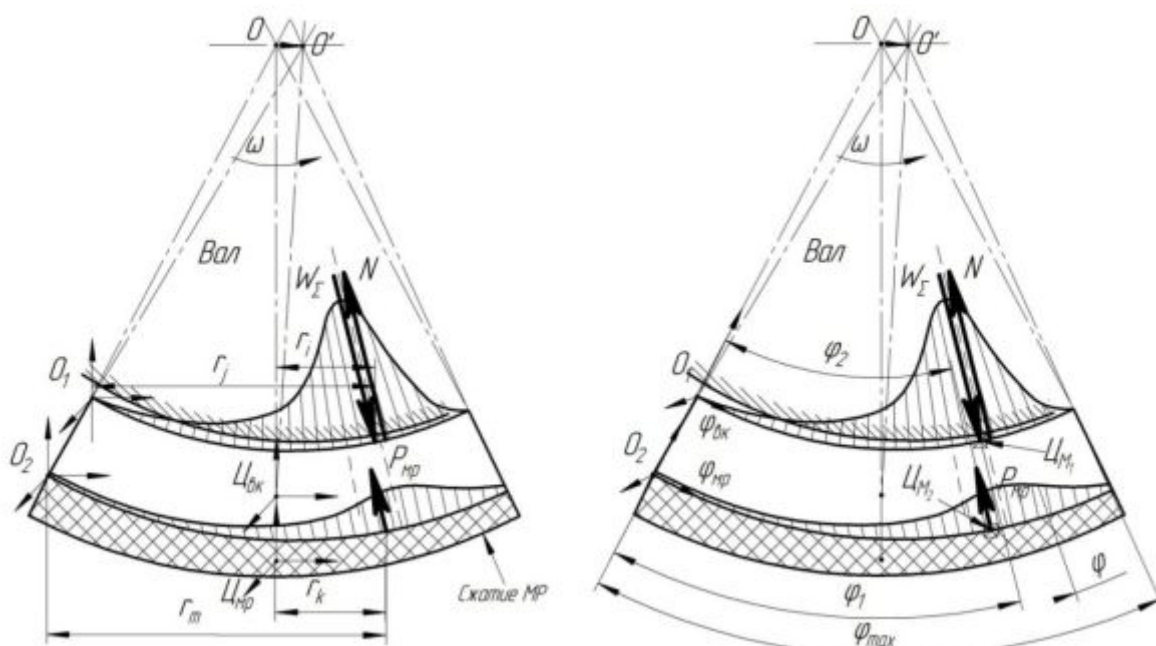


Рис. 3. Формирование момента и силы давления в рабочем зазоре подшипника

Нагрузка P вызывает давление Q в материале МР, которое выражается через удельное давление q .

Для отыскания точки приложения равнодействующей всех сил совместно решаются уравнения, описывающие силы, возникающие в системе (2), (4), и выведенные уравнения равенств моментов для сил давления рабочей среды и сил реакции МР (5), (6):

$$P_{MP} = \int_0^{\psi} q_m \cdot F_m \cos \psi \cdot d\psi, \quad (2)$$

$$q_m = \frac{Q}{F_{MP}}, \quad (3)$$

$$N = -W_{\Sigma} = \int_0^{\varphi} p_i \cdot r_i \cdot d\varphi \cdot b, \quad (4)$$

$$\int_0^{\varphi_1} p_i r_i \cos \varphi \cdot d\varphi \cdot b(\varphi_1 - \varphi) =$$

$$= \int_{\varphi}^{\varphi_{\max}} p_i r_i \cos \varphi \cdot d\varphi \cdot b(\varphi - \varphi_1), \quad (5)$$

$$\int_0^{\varphi_1} q_k F_k \cos \varphi \cdot d\varphi (\varphi_1 - \varphi) =$$

$$= \int_{\varphi}^{\varphi_{\max}} q_k F_k \cos \varphi \cdot d\varphi (\varphi - \varphi_1). \quad (6)$$

В уравнениях (1) - (6) введены следующие обозначения: φ_1, φ_2 – искомые угловые координаты точки приложения равнодействующих сил; ψ – угловая координата рассматриваемого участка; W_{Σ} – суммарная (проинтегрированная) сила давления на вкладыш; b – ширина вкладыша; p_i – давление на i -й участок вкладыша; r_i, r_j – радиусы точки приложения силы давления (CO1, CO2); $F_{i(m)}$ – площадь одного участка для интегрирования; $q_{i(m)}$ – удельное давление на вкладыш:

$$q_m = \frac{\bar{A} \cdot E \cdot \left(\frac{h_m + \beta P_m}{H_{вк}} \right)}{1 + a \left(\frac{h_m + \beta P_m}{H_{вк}} \right)}, \quad (7)$$

где β – удельная податливость упругой поверхности; E – модуль упругости проволоки; \bar{A}, a – безразмерные параметры деформационной характеристики.

При совместном решении (3) – (6) с учётом (7) находятся φ_1, φ_2 – искомые угловые координаты точки приложения равнодействующих сил. Приравниванием найденных φ_1 и φ_2 , выраженных через силы N и P_{MP} , находятся оптимальные значения нагрузок.

Разработанная математическая модель содержит подэтап расчёта упруго-демпферных характеристик МР. Полученные зависимости могут быть использованы для оптимизации геометрии вкладышей и определения характеристик МР (диаметра проволоки и др.)

Математическая модель определения оптимальных характеристик материала МР для упругого подвеса вкла-

дышей подшипника. Результаты программного гидродинамического расчёта характеристик течения смазки в рабочем зазоре подшипника (ANSYS CFX), а именно распределение давления по рабочему зазору [3,4], также являются входными данными для определения параметров материала упругого подвеса – диаметра проволоки, плотности материала МР, материала проволоки, воспринимаемой нагрузки и др. Оптимизация этих параметров является условием безотказной работы подшипника, ввиду его малорасходности, наличия сверхузкого рабочего зазора (от 1 до 5 мкм) и механизма поворота вкладышей на упругом подвесе. Разработанная методика строится на модели В.Н. Бузицкого и А.А. Тройникова для материала МР [5].

Зависимости величин деформации вкладыша из металлорезины a_n и нагрузки на вкладыш T_n от исходных параметров МР определяются из выражений, полученных согласно теоремы Букингема на основе метода Рэлея:

$$a_n = K_1 \bar{\sigma}_{Tu} H_c \left(1, 1 + 0,2\bar{\Delta}_0 - 0,9\bar{\Delta}_0^2 \right) \times$$

$$\times \left(0,64 - \bar{\rho}_c \right) \left(0,2 - \bar{\rho}_3 \right) \left(20 + \bar{d}_u \right), \quad (8)$$

$$T_n = K_2 \bar{\sigma}_{Tu} S \left(0,8 - 2,3\bar{\Delta}_0 + 3,4\bar{\Delta}_0^2 \right) \times$$

$$\times \left(\bar{\rho}_c - 0,03 \right) \left(\bar{\rho}_3 + 0,02 \right) \left(23 - \bar{d}_u \right), \quad (9)$$

где K_1 и K_2 – согласующие постоянные; $\bar{\sigma}_{Tu} \bar{\sigma}_{Tu}$ – предел текучести и относительный предел текучести материала проволоки; H_c – высота образца в свободном состоянии; S – площадь поперечного сечения образца; $\bar{\Delta}_0$ – относительный осевой натяг образца; $\bar{\rho}_c$ – относительная плотность МР; $\bar{\rho}_3$ – относительная плотность заготовки; \bar{d}_u – относительный диаметр проволоки.

На рис. 4 показаны основные геометрические величины, используемые в расчёте оптимальных характеристик МР. Здесь p_i – распределение давления по вкладышу подшипника (CFX); $P_{эф}$ – эффективная (осреднённая) нагрузка на вкладыш из металлорезины; $h_{эф}$ – эффек-

тивная толщина (высота) слоя МР, т.е. толщина после приложения нагрузки. Требуемая (эффективная) жёсткость материала МР определяется отношением нагрузки к деформации и соответствует жёсткости, рассчитанной по P – интегральной нагрузке (давлению) и $\Delta l_{эф}$ – эффективной деформации МР от приложения интегральной нагрузки P :

$$C_{эф} = \frac{T_n}{a_n} = \frac{P}{\Delta l_{эф}}. \quad (10)$$

Система уравнений (11) содержит три неизвестные: относительную плотность материала МР $\bar{\rho}_c$; нагрузку на вкладыш

T_n и соответствующую ей деформацию a_n . Для упрощения процесса преобразований вводятся параметры A и B , включающие в себя только известные параметры.

$$\begin{cases} a_n = A(0,64 - \bar{\rho}_c), \\ T_n = B(\bar{\rho}_c - 0,03), \\ T_n = a_n \cdot C. \end{cases} \quad (11)$$

$$A = K_1 \bar{\sigma}_{Tu} H_c (1,1 + 0,2\bar{\Delta}_0 - 0,9\bar{\Delta}_0^2) \times (0,2 - \bar{\rho}_3)(20 + \bar{d}_u) \quad (12)$$

$$B = K_2 \sigma_{Tu} S (0,8 - 2,3\bar{\Delta}_0 + 3,4\bar{\Delta}_0^2) \times (\bar{\rho}_3 + 0,02)(23 - \bar{d}_u) \quad (13)$$

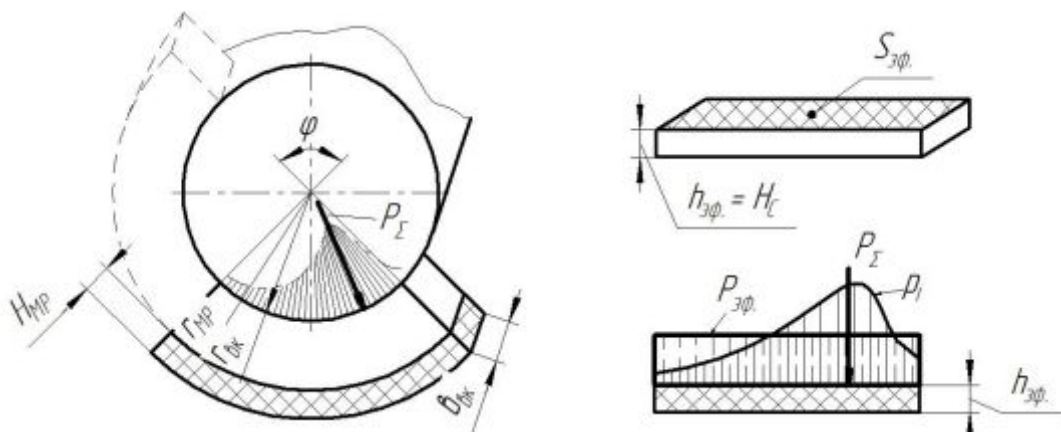


Рис. 3. К определению характеристик МР

Решением системы (11) являются выражения для $\bar{\rho}_c$, T_n и a_n .

$$\bar{\rho}_c = \frac{0,64AC + 0,03B}{B + AC}, \quad (14)$$

$$a_n = A \left(0,64 - \frac{0,64AC + 0,03B}{B + AC} \right), \quad (15)$$

$$T_n = AC \left(0,64 - \frac{0,64AC + 0,03B}{B + AC} \right). \quad (16)$$

Для определения характеристик материала МР значения параметров выбираются исходя из опыта специалистов ОНИЛ-1 СГАУ по производству средств виброзащиты изделий.

Для для первой итерации оптимизации: $\bar{\Delta}_0 = 0,5$; $\rho_3 = 0,35 \text{ г/см}^3$; $K_1 = 2,02$; $K_2 = 17,6 \cdot 10^{-5}$; материал проволоки МР ЭИ

708-А ВИ: $\rho_u = 8 \text{ г/см}^3$; $\sigma_{Tu} = 1100 \text{ МПа}$; $E_u = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

Через исходные данные: относительный осевой натяг образца $\bar{\Delta}_0$; ρ_3 ; K_1 , K_2 ; характеристики материала проволоки ρ_u , σ_{Tu} , E_u ; относительный диаметр проволоки \bar{d}_u и определённые значения $\bar{\rho}_c$, T_n и a_n находятся требуемые характеристики МР, в том числе и диаметр проволоки δ_u .

Путём построения и исследования характеристик описанной модели возможности данной методики расширяются до оптимизации параметров упругого подвеса по величинам, постоянным в первом приближении: осевому натягу, относительному диаметру проволоки, диамет-

ру спирали, характеристикам материала.

Разработанные математические модели поведения системы "зазор - вкладыш - МР" позволяет на основе результатов CFD-расчётов характеристик течения смазки в рабочем зазоре подшипника и величины нагрузки, воспринимаемой подшипником, найти оптимальные значе-

ние параметров материала упругого подвеса при проектировании подшипника.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления правительства РФ №218 от 09.04.2010.

Библиографический список

1. Yan H., Jiang H., Zhao H., Liu W., Ulanov A.M. Temperature characteristics of metal rubber material // Xiyou Jinshu Cailiao Yu Gongcheng/Rare Metal Materials and Engineering. 2011. V. 40, no. 12. P. 2092-2095.

2. Ulanov A.M., Ponomarev Yu.K. Finite element analysis of elastic-hysteretic systems with regard to damping // Russian Aeronautics. 2009. V. 52, no. 3. P. 264-270.

3. Паровай Е.Ф., Паровай Ф.В. Гидродинамический подшипник с упругим подвесом вкладышей из материала МР // Авиационно-космическая техника и технология. 2013. № 8(105). С. 201-205.

4. Паровай Е.Ф., Гордеев В.Б. Проектирование гидродинамического подшипника авиационного двигателя // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета (национального исследовательского университета). 2012. № 3(34), часть 2. С.107-111.

5. Бузицкий В.Н. и др. Расчёт втулочных амортизаторов из материала МР, работающего на сжатие // Сборник научн. трудов «Вибрационная прочность и надёжность двигателей и систем летательных аппаратов». Вып. 3. Куйбышев: КуАИ, 1976. С. 15-21.

Информация об авторах

Паровай Елена Фёдоровна, младший научный сотрудник ОНИЛ-1, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: selena_pa@mail.ru. Область научных интересов: гидродинамические подшипники, моделирование процессов течения смазки в узких зазорах, теория металлорезины.

Паровай Фёдор Васильевич, кандидат технических наук, доцент, главный инженер ОНИЛ-1, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: parovai@mail.ru. Область научных интересов: теория и технологии металлорезины, вибро-и ударозащита изделий, конструкция и прочность двигателей, материал МР.

**CALCULATION METHOD
FOR DETERMINING THE CHARACTERISTICS OF ELASTIC-DAMPING
SUSPENSION MADE OF METAL ANALOQUE OF RUBBER FOR PLAIN
BEARINGS**

©2014 Ye. F. Parovay, F.V. Parovay

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The paper is devoted to creating a comprehensive methodology for calculating the characteristics of hydrodynamic bearings of a new type. The design of these bearings has several advantages in comparison with rolling bearings and traditional hydrodynamic bearings. However, the creation of effective bearings requires the development of their design methodology based on accurate mathematical apparatus and the use of the capabilities of modern CAE-programs. One of the most important stages of the design is to determine the required parameters of the elastic suspension material. The paper discusses developed mathematical models of the "working gap - bearing - elastic suspension" system behavior. The model is created with the aim of determining the characteristics of the elastic suspension material to ensure the best operation of the bearing. The mathematical apparatus developed is based on the model of V.N. Buzitskiy and A.A. Troynikov for the MR material and takes into account the peculiarities of the lubrication flow in the gap of the bearing. The paper presents a method of calculating the basic characteristics of the MR material, such as wire diameter, deformation and material density. The required parameters are determined on the basis of the results of CFD calculations of lubricant flow characteristics (pressure distribution in the working gap, the amount of deformation etc.).

Liner, deformation, wire diameter, mathematical model, MR (metal analogue of rubber), load, working characteristics.

References

1. Yan H., Jiang H., Zhao H., Liu W., Ulanov A.M. Temperature characteristics of metal rubber material // *Xiyou Jinshu Cailiao Yu Gongcheng/Rare Metal Materials and Engineering*. 2011. V. 40, no. 12. P. 2092-2095.
2. Ulanov A.M., Ponomarev Yu.K. Finite element analysis of elastic-hysteretic systems with regard to damping // *Russian Aeronautics*. 2009. V. 52, no. 3. P. 264-270.
3. Parovay Ye.F., Parovay F.V. Hydrodynamic bearing with elastic suspension of MR liners // *Aerospace engineering and technology*. 2013. No. 8(105). P. 201-205 (In Russ.)
4. Parovay Ye.F., Gordeev V.B., Falaleev S.V. Designing of hydrodynamic bearings for aircraft engines // *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2012. No. 3(34), part 2. P. 107-111. (In Russ.)
5. Buzitsky V.N., Troynikov A.A. Analysis of shock absorbers made of MR material working in compression // *The vibration resistance and reliability of engines and flying vehicles*. 1976. No. 3. P. 15-21. (In Russ.)

About the authors

Parovay Elena Fyodorovna, Associate Research Fellow, Industrial Research Laboratory №1, Samara State Aerospace University. E-mail: selena_pa@mail.ru. Area of Research: hydrodynamic bearings, simulation of lubricant flow in fluid films, theory of metal analog of rubber.

Parovay Fyodor Vasilievich, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Samara State Aerospace University. E-mail: parovai@mail.ru. Area of Research: theory and technology of MR (metal analogue of rubber).