

**Хлопенко Н.Я.,
Сорокина Т.Н.**

Национальный университет
кораблестроения имени адм. Макарова,
г. Николаев, Украина
E-mail: tan-sorokina@yandex.ru

ТУРБУЛЕНТНАЯ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ СМАЗКА СТУПЕНЧАТОГО ПОДПЯТНИКА РЭЛЕЯ

УДК 621.822

Построена численная модель для изучения статических характеристик ступенчатого подпятника Рэлея при турбулентном неізотермическом течении смазки. На конкретном примере показано, что расчетные значения этих характеристик хорошо согласуются с экспериментальными данными других исследователей.

Ключевые слова: подпятник Рэлея ступенчатый, численная модель, турбулентная смазка, режим неізотермический.

Введение

При высоких скоростях вращения, характерных для нового поколения турбомашин и других технических устройств, течение смазки в упорных узлах жидкостного трения является турбулентным и сопровождается повышенным тепловыделением вследствие значительных потерь мощности на трение. При таком течении смазки использование ступенчатого подпятника Рэлея [1], по-видимому, наиболее целесообразно.

Несмотря на то, что ступенчатым подпятникам Рэлея посвящено много работ, до сих пор расчеты его статических характеристик в турбулентном режиме при неізотермической смазке не проводились, хотя имеются обстоятельные экспериментальные и теоретические исследования этих характеристик применительно к изотермическому течению смазки [1], это подтверждает необходимость проведения таких исследований.

Целью данной работы является определение статических характеристик ступенчатого подпятника Рэлея при турбулентном неізотермическом течении смазки.

Исходными уравнениями для определения статических характеристик подпятника служили уравнение Рейнольдса для давлений в слое и уравнение энергии, в которых коэффициенты турбулентности рассчитывались по методу В.Н. Константиnescу [2]. Численное решение проводилось применительно к ступенчатому подпятнику Рэлея [1]. Показано, что при учете тепловых эффектов в математической модели турбулентности расчетные значения грузоподъемности, температур, расхода смазки и потерь мощности на трение с достаточной для практики точностью совпадают с экспериментальными данными, приведенными в работе [1].

Принципиальная конструктивная схема подпятника и основные расчетные формулы

Принципиальная конструктивная схема подпятника со ступенями Рэлея приведена на рис. 1.

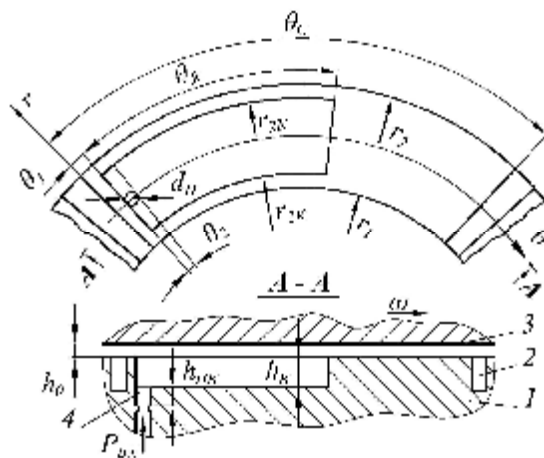


Рис. 1 – Принципиальная конструктивная схема подпятника с закрытой ступенью Рэлея:

- 1 – подпятник;
- 2 – дренажная канавка;
- 3 – пятя;
- 4 – питающая канавка

Он состоит из подпятника 1 и пяты 3. Рабочие поверхности подпятника выполнены секторной формы с закрытыми ступенями (карманами). Между этими секторами выполнены дренажные канавки 2, через которые отводится масло на выходе из ступеней.

Пята (поз. 3) вращается вокруг неподвижной оси с угловой скоростью ω . Смазка подается под давлением P_{ex} через дроссель типа диафрагма к питающей канавке 4, расположенной на входе в карман каждой ступени. Питающая канавка утоплена на глубину $h_{нк}$ (рис. 1) относительно рабочей поверхности кармана.

Во время работы подпятника вращающаяся пята (поз. 3) вовлекает в движение смазочную жидкость, находящуюся в питающей канавке, и продвигает ее по карману по направлению к ступени. В результате возникает градиент давления вдоль ступени, благодаря которому пята отделяется от рабочей поверхности подпятника, образуя узкую ступенчатую щель, заполненную смазкой. Боковые уплотнительные площадки служат для ограничения боковых утечек смазки из кармана и, следовательно, увеличивают способность подпятника Рэлея к генерации давления.

Распределение давлений и температур в масляной пленке для каждой ступени подпятника определяется из совместного решения стационарного уравнения Рейнольдса и переноса энергии для адиабатического смазочного слоя [2 - 4]:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{h^3}{\mu k_\theta} \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) + r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r h^3}{\mu k_r} \frac{\partial P}{\partial r} \right) = \frac{1}{2} \omega r^2 \frac{\partial h}{\partial \theta}; \quad (1)$$

$$\rho c_p \left(\frac{q_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + q_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \tau_c \frac{\mu (r\omega)^2}{h} + \frac{h^3}{\mu} \left[\frac{1}{k_\theta} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} \right)^2 + \frac{1}{k_r} \left(\frac{\partial P}{\partial r} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где r, θ – полярные координаты (см. рис.1);

h – толщина смазочного слоя между рабочими поверхностями пяты и подпятника;

ρ, c_p, μ – плотность, удельная теплоемкость и динамический коэффициент вязкости слоя;

k_θ, k_r, τ_c – коэффициенты турбулентности;

P, T – избыточное давление и температура слоя;

ω – угловая скорость пяты;

q_θ, q_r – удельные расходы смазки в окружном и радиальном направлениях.

Толщина масляного слоя определяется по формуле:

$$h = h_0 + \varepsilon (h_k + \varepsilon_1 h_{нк}),$$

где h_0 – толщина смазочного слоя вне области кармана (см. рис.1);

$\varepsilon = 0$ – вне областях кармана и питающей канавки и $\varepsilon = 1$ в области кармана;

$\varepsilon_1 = 1$ в области питающей канавки и $\varepsilon_1 = 0$ в остальных областях.

Удельные расходы смазки описываются зависимостями:

$$q_\theta = \omega r \frac{h}{2} - \frac{h^3}{\mu k_\theta} \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta}; \quad (3)$$

$$q_r = - \frac{h^3}{\mu k_r} \frac{\partial P}{\partial r}. \quad (4)$$

Граничными условиями для уравнения (1) служат равенство нулю давлений по замкнутому контуру Γ , образованному дугами окружностей радиусов r_1 и r_2 сектора и радиальными прямыми $\theta = \theta_0 = 0$ и $\theta = \theta_c$, и избыточное давление P_{ex} на контуре σ области подвода смазки, а для уравнения (2) – начальная температура масла T_0 на входе смазки в указанный контур (при $\theta = 0$):

$$P|_{\Gamma} = 0; P|_{\sigma} = P_{ex}; T|_{\theta=0} = T_0. \quad (5)$$

В случае обрыва слоя на выходе из несущего зазора к ним присоединяется условие обращения в нуль градиента давлений на линии его обрыва, которая может и не совпадать с отрезком прямой $\theta = \theta_c$.

Плотность масла ρ принимается постоянной в силу слабой зависимости ее от температуры.

Зависимость вязкости масла от температуры аппроксимируем экспоненциальной функцией вида:

$$\mu = \mu_0 \exp(-\alpha(T - T_0)), \quad (6)$$

где μ_0, T_0 – вязкость и температура масла на входе в смазочный слой;

α – температурный коэффициент вязкости. Для данного сорта масла $\alpha = \text{const}$.

Для определения коэффициентов турбулентности и напряжения трения используется модель турбулентности В.Н. Константинеску для течения Куэтта [2], в которой коэффициенты:

$$k_\theta = 12 + 0,0136 \cdot \text{Re}^{0,9}; k_r = 12 + 0,0043 \cdot \text{Re}^{0,96}, \quad (7)$$

а поправка на касательное напряжение, найденная по экспериментальным данным работы [2],

$$\tau_c = 1 + 0,012 \cdot \text{Re}^{0,94}. \quad (8)$$

Константинеску В.Н. также показал [2], что, если преобладает течение Пуазейля, коэффициенты k_θ и k_r можно определить приближенно по формуле:

$$k_\theta = k_r = k = 0,147 \cdot \text{Re}^{0,681}. \quad (9)$$

Эту формулу следует использовать в том случае, когда величина k больше значений k_θ и k_r , рассчитанных по формулам (7) и (8).

Заметим, что в выражениях (7) и (8) число Рейнольдса Re определяется по скорости точек пяты на радиусе r , а в формуле (9) – по средней скорости жидкости по толщине зазора между рабочими поверхностями трения на том же радиусе.

Система уравнений (1) и (2) с учетом (3) - (4), (6) - (8) и заданных граничных условиях (5) решается численно на конечно - разностной сетке вначале методом простой, а затем последовательной верхней релаксации [5] на персональном компьютере. При этом за начальное приближение принимается нулевое давление в каждом узле конечно-разностной сетки.

На каждой итерации давление в узловых точках сетки определяется по методу контрольного объема, а давление подвода смазки P_{ex} через питающее отверстие - из уравнения баланса расхода смазки через дроссель и смазочный слой по внешнему контуру Γ сектора пяты.

Применение метода последовательной верхней релаксации обеспечивает улучшение сходимости решения уравнений Рейнольдса и энергии, и сокращает число итераций при достижении заданной точности.

В процессе численного решения задачи рассчитываются следующие статические характеристики подпятника:

- грузоподъемность:

$$W = z_c \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{\theta_c} P r d\theta dr; \quad (10)$$

- потери мощности на трение:

$$N_{TP} = z_c \omega \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{\theta_c} \left(-\frac{h}{2r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \tau_c \mu \frac{\omega r}{h} \right)^2 d\theta dr; \quad (11)$$

- расход смазки:

$$Q = z_c \left(\int_{r_1}^{r_2} q_{\theta_0} dr + \int_{r_1}^{r_2} q_{\theta_c} dr + \int_0^{\theta_c} q_{r_1} r d\theta + \int_0^{\theta_c} q_{r_2} r d\theta \right), \quad (12)$$

где z_c – число расчетных секторов;

$q_{\theta_0}, q_{\theta_c}, q_{r_1}, q_{r_2}$ – соответственно, объемные расходы смазки на входе ($\theta = \theta_0 = 0$), выходе ($\theta = \theta_c$) и по краям при $r = r_1$ и $r = r_2$ граница Γ несущего слоя.

Анализ полученных результатов

Численные расчеты проводились для ступенчатого подпятника Рэлея [1] со следующими исходными данными: $r_1 = 46,5$ мм; $r_2 = 63,5$ мм; $r_{1к} = 49,6$ мм; $r_{2к} = 60,4$ мм; $\theta_c = 88^\circ$; $\theta_k = 48,2^\circ$; $\theta_1 = 3^\circ$; $\theta_2 = 3^\circ$; $d_n = 3$ мм; $h_k = 0,38$ мм; $h_{nk} = 0,19$ мм; количество секторов $z_c = 4$; $n = 20000$ об/мин; $P_{\text{ex}} = 0,35$ МПа; масло марки MIL-L-23699 с начальной температурой $T_0 = 120$ °С, вязкостью $\mu_0 = 0,0035$ Па·с, плотностью $\rho = 950$ кг/м³ и удельной теплоемкостью $c_p = 1,830$ кДж/(кг·К).

Все вычисления были выполнены с использованием координатной конечно - разностной сетки размером 100×100 . Расчет поля давлений и температур в каждом узле этой сетки начинался при нулевых значениях давления и заканчивался в том случае, когда относительная погрешность в определении давления становилась равной 0,1 %, а для температуры 0,05 %.

Рис. 2 дает представление о грузоподъемности W и расходе смазки Q (кривые 1) в зависимости от толщины слоя h_0 . Там же приведены экспериментальные значения этих характеристик (кривые 2), взятые из работы [1]. Видно, что расчеты по данной теории дают несколько завышенные значения этих характеристик по сравнению с экспериментальными данными.

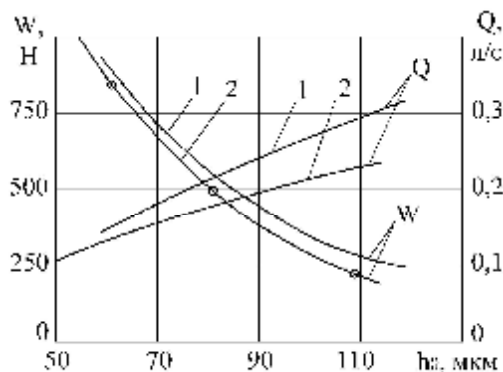


Рис. 2 – Зависимости грузоподъемности W и расхода масла Q от толщины слоя смазки h_0 :
1 – настоящая работа,
2 – эксперимент [1]

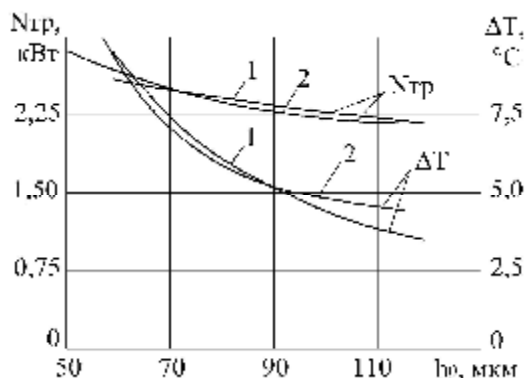


Рис. 3 – Зависимости потери мощности на трение $N_{тр}$ и перегрева ΔT масляного слоя от h_0 :
1 – настоящая работа,
2 – эксперимент [1]

На рис. 3 приведены расчетные кривые перегрева ΔT и потери мощности на трение $N_{тр}$ по данной теории (линии 1) и экспериментальные (линии 2) по работе [1]. Как и следовало ожидать, с увеличением толщины слоя h_0 перегрев слоя смазки ΔT и потери мощности на трение $N_{тр}$ падают вследствие уменьшения гидравлического сопротивления зазора между рабочими поверхностями трения и возрастания расхода смазки Q .

Для оценки влияния коэффициентов турбулентности (8) и (9) на статические характеристики подпятника Рэлея были проведены также расчеты этих характеристик при нулевых значениях критерия Рейнольдса ($Re = 0$). Они показали, что учет турбулентности в расчетной модели приводит к возрастаниям грузоподъемности в 3,08 раза, потери мощности на трение в 3,9 раза и расхода смазки в 1,87 раз и перегрева смазочного слоя на 2,49 % при толщине зазора $h_0 = 60$ мкм по сравнению с расчетами по модели ламинарного течения.

Таким образом, построена численная модель для изучения статических характеристик ступенчатого подпятника Рэлея при турбулентном неизомермическом течении смазки.

Выводы

1. Известные методы расчета статических характеристик ступенчатого подпятника Рэлея не учитывают турбулентность и неизотермичность течения смазки в несущем зазоре между рабочими поверхностями жидкостного трения. Поэтому при высоких частотах вращения роторов, при которых режим течения смазки становится турбулентным, они являются сугубо приближенными и не удовлетворяют запросам практики.

2. Построенная численная модель статических характеристик ступенчатого подпятника Рэлея, учитывающая в отличие от известных турбулентность и неизотермичность течения смазки, позволяет существенно повысить точность проводимых расчетов, что подтверждается экспериментальными данными других исследователей.

Литература

1. Уилкок. Повышение долговечности установок с подшипниками качения благодаря использованию комбинированного подшипника [Текст] / Уилкок, Уин // Проблемы трения и смазки: Тр. Амер. о-ва инж.-мех. – М.: Мир, 1970. - № 3. – С. 34-42.

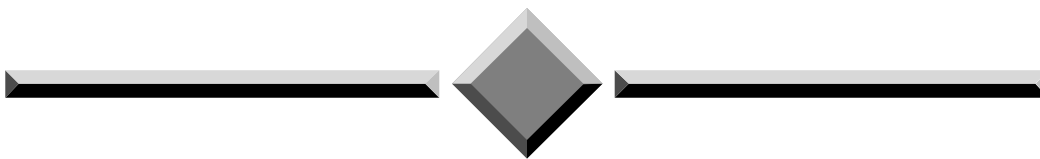
2. Константиnescу В. Н. Теория турбулентной смазки и ее обобщение с учетом тепловых эффектов [Текст] / Константиnescу // Проблемы трения и смазки : Тр. Амер. о-ва инж.-мех. – М.: Мир, 1973. – № 2. – С. 35-43.

3. Уилкок. Турбулентная смазка и ее роль в современной технике [Текст] / Уилкок // Проблемы трения и смазки: Тр. Амер. о-ва инж.-мех. – М.: Мир, 1974. - № 1. – С. 2-7.

4. Капитао. Влияние турбулентности на эксплуатационные характеристики упорных подшипников с самоустанавливающимися вкладышами [Текст] / Капитао // Проблемы трения и смазки: Тр. Амер. о-ва инж.-мех. – М.: Мир, 1974. - № 1. – С. 122-129.

5. Шокин Ю. И. Метод дифференциального приближения. Применение к газовой динамике [Текст] / Ю. И. Шокин, Н. Н. Яненко. – Новосибирск: Наука, 1985. – 357 с.

Поступила в редакцию 23.10.2013



Проблеми трибології
“Problems of Tribology”

E-mail: tribosenator@gmail.com

Khlopenko N.Y., Sorokina T.N. Turbulent anisothermic lubrication for the Rayleigh step bearing.

This article is devoted to the Reyleigh's step bearing static characteristics analysis at the turbulent anisothermic lubrication. In this type of bearing the pressure gradient is making in time of lubrication charging to the stage pocket under the pressure from the feeding groove.

The Reinold's equation for pressure in the layer, the energy and the oil consumption balance equations were the basis initial systems for a Reyleigh's step bearing static characteristics determination. Turbulence coefficients were calculated using Constantinescu method for incompressible fluid. The finite difference mesh with a cross scheme was used. The mesh solutions were based on the method of consecutive over relaxation; it gives the possibility to reduce the number of interactions and obtained the required accuracy.

The program and the Reyleigh's step bearing static characteristics calculations were carried out on the basis of above mentioned numerical model. The numerical example shows that the theoretical values of exploring characteristics are well conformed to different scientist test researchers. The turbulence effect was shown to increase the capacity, friction and power losses.

The numerical model for the Rayleigh's step bearing static characteristics analysis at the turbulent anisothermic lubrication is allows carrying out the bearing main factor calculations at the turbulent regime accounting changing the viscosity, temperature and density.

The results can become the basic part for the further Reyleigh's step bearing design for high-speed turbo machines.

Key words: Reyleigh step bearing, numerical model, turbulent lubrication, anisothermic regime.

References

1. Uilkok. Povyshenie dolgovechnosti ustanovok s podshipnikami kachenija blagodarja ispol'zovaniju kombinirovannogo podshipnika. Problemy trenija i smazki: Tr. Amer. o-va inzh.-meh. M. Mir, 1970. № 3. S. 34-42.
2. Konstantinesku V. N. Teorija turbulentnoj smazki i ee obobshhenie s uchetom teplovyh jeffektov. Problemy trenija i smazki : Tr. Amer. o-va inzh.-meh. M.: Mir, 1973. № 2. S. 35-43.
3. Uilkok. Turbulentnaja smazka i ee rol' v sovremennoj tehnike. Problemy trenija i smazki: Tr. Amer. o-va inzh.-meh. M. Mir, 1974. - № 1. S. 2-7.
4. Kapitao. Vlijanie turbulentnosti na jekspluatacionnye harakteristiki upornyh podshipnikov s samoustanavlivajushhimisja vkladysami. Problemy trenija i smazki: Tr. Amer. o-va inzh.-meh. M.: Mir, 1974. № 1. S. 122-129.
5. Shokin Ju. I., Janenko N. N. Metod differencial'nogo priblizhenija. Primenie k gazovoj dinamike . Novosibirsk: Nauka, 1985. 357 s.