УДК 532. 5

**РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДШИПНИКА ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ УПРАВЛЯЕМЫХ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА**

**Корнаева Е.П., Майоров С.В., Фетисов А.С.**

*Россия, г. Орел, ОГУ имени И.С. Тургенева*

*В статье приведены результаты экспериментального исследования по влиянию характеристик разнотемпературной смазки на характеристики опоры скольжения: проекции реакции подшипника на оси Х, Y, момент трения подшипника. Приведены данные о концептуальной модели подшипника, основные соотношения, приведены граничные условия.*

***Ключевые слова:*** *напорно-сдвиговое течение, несоосные цилиндры, вязкая жидкость, конвекция, диссипация*

1. Введение

Тепловые эффекты, возникающие в опорах скольжения в процессе функционирования, значительно влияют на характеристики работы подшипника. Одним из первых тепловые эффекты в гидродинамических опорах скольжения исследовал Khonsari [1-4]. Известно достаточно большое количество работ, направленных на получение достоверных тепловых характеристик подшипника скольжения [5-7]. Большая часть исследований направлена на исследование упругих и тепловых деформаций подшипников, а именно на неравномерное расширение втулки и цапфы ротора, что приводит к изменению зазора опоры вплоть до заклинивания вала во втулке подшипника [3-6,8,9]. Наряду с изменением геометрических параметров из-за температурных эффектов, происходит изменение свойств смазочного материала [10]. Работы в данной области говорят, что изменение вязкости смазки оказывает большее влияние на характеристики опоры скольжения, чем термическая и упругая деформация элементов подшипника [8]. Тепловые эффекты влияют на минимальную толщину смазочной пленки, что приводит к увеличению грузоподъемности, более высоким максимальным давлениям и еще большему увеличению температуры подшипника [11-13]. Наиболее поздние работы направлены на исследование эффектов кавитации и турбулентности на работу гидродинамических опор скольжения [14-16]. Таким образом, область исследования тепловой динамики подшипников скольжения с учетом тепловых расширений вала ротора является актуальной задачей.

В данной работе рассматривается моделирование гидродинамического радиального подшипника скольжения, смазываемого смазочными материалами с управляемыми температурными свойствами.

1. Математическая модель

2.1 Основные уравнения

Исследуется течение вязкой несжимаемой жидкости в несоосном канале (рисунок 1), образованном двумя цилиндрами длиной , внешний цилиндр радиуса  неподвижен, внутренний радиуса  вращается с постоянной угловой скоростью  и совершает колебания в радиальном направлении, траекторией которых является окружность некоторого наперед известного радиуса  (,). Осуществляется осевая подача жидкости температурой  под давлением  с одного торца. ,  - осевой перепад температуры и давления соответственно. Поле скоростей предполагается трехмерным 



***Рисунок 1 – Расчетная область***

Основные уравнения, описывающие данный процесс, удобнее представить в цилиндрической системе координат. Уравнения неразрывности и Навье-Стокса с учетом несжимаемости жидкости в тензорном виде можно представить как:

 (1)

 (2)

где  - плотность жидкости;

 - удельная массовая сила;

 - функция давления;

 - девиатор тензора напряжений.

Изменение температурного поля относительно начального  описывается уравнением теплового баланса [8-10]:

 (3)

где  - неизвестная функция температуры;

 - коэффициент теплопроводности жидкости;

 - коэффициент теплоемкости жидкости;

 - вязкость жидкости;

 - компоненты девиатора тензора скоростей деформации.

* 1. Граничные и начальные условия

Для решения задачи течения жидкости различной температуры между несоосными вращающимися цилиндрами был использована система конечно-элементного анализа Ansys, а именно программа расчета динамики жидкости и газов Ansys CFX [17]. В соответствии с поставленной задачей расчетная область представляет собой объем зазора подшипника скольжения, ограниченный следующими границами:

1. Неподвижная внешняя стенка. На данной границе выполняется условие прилипания. Процесс теплообмена – адиабатный
2. Подвижная внутренняя стенка. На данной границе выполняется условие прилипания. Процесс теплообмена – адиабатный. Данная область вращается относительно центра данной области с заданной частотой вращения.
3. Выходная область. На данной границе задается избыточное нулевое значение.
4. Входные области. На входах задаются давление подачи и температура подающегося смазочного материала.

Объем зазора заполнен однородной жидкостью, течение которой описывается уравнениями гидродинамики [17]. В качестве модели турбулентности была использована K-epsilon модель [18].

В качестве реологической модели была использована зависимость:

 (1)

где  - динамическая вязкость, Па\*с, - температура, К.

Для описанных выше условий была сформирована расчетная сетка. Для учета поступательных скоростей вала рассматриваемая область была разбита на 10 слоев. Для этого в процессе создания геометрии рабочее тело разделено на 2 части по XY-плоскости. Длина окружности была разбита на 1000 равных отрезков. Расчетная сетка по длине зазора подшипника была сформирована при помощи метода протяжки.

2.3 План эксперимента

В процессе подготовки вычислительного эксперимента был выполнен план эксперимента. В качестве варьируемых значений были использованы температура на одном из входов и положение центра цапфы. План разработанного многофакторного эксперимента приведен в таблице 1. Температура на второй входной области ограничена 50°C. Также неварьируемыми параметрами являются давления подачи и слива, плотность смазочного материала, геометрические параметры подшипника: диаметр цапфы и втулки, диаметральный зазор, длина подшипника.

*Таблица 1 – План эксперимента*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Варьируемая величина | Значения | Количество измерений |
| Положение цапфы | (е,0), (-е,0), (0,е), (0,-е) | 4 |
| Температура одного из входов | 20, 35, 50 °C | 3 |
| Относительный эксцентриситет, е | 0.5, 0.7, 0.9 | 3 |
| Количество экспериментов | 36 |

1. Результаты

Результаты вычислительного эксперимента показаны на рисунках 2-4. На рисунке 2 изображено графическое представление проекции реакции подшипника на ось Х. На рисунке присутствуют 12 точек, для каждой из которых предложены 3 значения: верхнее значение для разницы температуры  °C между температурами на двух входных областях подшипника скольжения, среднее значение для  °C и нижнее для максимальной разницы температур  °C.

***Рисунок 2 – Расчет проекции силы на ось Х***

Результаты показывают, что влияние разнотемпературной смазки незначительно при условиях, которые исследовались в рамках данной работы. Относительно проекции реакции подшипника на ось Х максимальное изменение значения силы составляет не более 4,5%, среднее изменение проекции на ось Х составляет около 1,5%. Характерной закономерностью является уменьшение значения силы при увеличении разницы температур между входами.

***Рисунок 3– Расчет проекции силы на ось Y***

Данная закономерность не характерна для проекции реакции подшипника на ось Y (рисунок 3). С увеличением разницы температур реакция закономерно увеличивается. Среднее увеличение составляет около 1,2%, максимальное 2,5%.

***Рисунок 4 – Расчет момента трения подшипника***

На рисунке 4 приведены данные о моменте трения подшипника. Результаты показывают, что с увеличением разницы температур смазочного материала на входах подшипника момент трения увеличивается. Среднее увеличение составляет около 1%, максимальное – около 1,5%

Выводы

В рамках данной работы были проведены численные экспериментальные исследования влияния разнотемпературной смазки на характеристики подшипника скольжения. Результаты экспериментального исследования показывают, что реакции подшипника значения и момент трения изменяются незначительно, что, вероятно, является следствием недостаточной широты проведенных исследований.

***Данное исследование выполнено в рамках проекта: №MK-3394.2019.8 «Совершенствование динамических качеств подшипников жидкостного трения высокоскоростных роторных машин в условиях управляемых реологических и тепловых эффектов».***

Список литературы

1. M. M. Khonsari, "A Review of Thermal Effects in Hydrodynamic Bearings Part II: Journal Bearings," [Text] ASLE Transactions, vol. 30, no. 1, pp. 26-33, 1986.
2. D. Dowson, J. D. Hudson, B. Hunter and C. N. March, "Paper 3: An Experimental Investigation of the Thermal Equilibrium of Steadily Loaded Journal Bearings, [Text] " in Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings, 1966.
3. H. McCallion, F. Yousif and T. Lloyd, "The Analysis of Thermal Effects in a Full Journal Bearing," [Text] Journal of Lubrication Technology, vol. 92, pp. 578-587, 1970.
4. J. Ferron, J. Frene and R. Boncompain, "A Study of the Thermohydrodynamic Performance of a Plain Journal Bearing Comparison Between Theory and Experiments, [Text] " Journal of Lubrication Technology, vol. 105, pp. 422-428, 1983.
5. Q. Chang, P. Yang, Y. Meng and S. Wen, "Thermoelastohydrodynamic analysis of the static performance of tilting-pad journal bearings with the Newton–Raphson method," [Text] Tribology International, vol. 35, no. 4, pp. 225-234, 2002.
6. J. L. Bishop and C. M. Ettles, "The Seizure of Journal Bearings by Thermoelastic Mechanisms, [Text] " Wear, vol. 79, no. 1, pp. 37-52, 1982.
7. P. K. P. Morton, "Thermoelastic Influences in Journal Bearing Lubrication, [Text] " Proc. Royal Soc. London A, Mathematical an dPhysical Sciences, vol. 403, pp. 111-134, 1986.
8. S. M. Rohde and K. P. Oh, "A Thermoelastohydrodynamic Analysis of a Finite Slider Bearing, [Text] " Journal of Lubrication Technology, vol. 97, pp. 450-460, 1975.
9. P. Monmousseau, M. Fillon and J. Frene, "Transient thermoelastohydrodynamic study of tilting-pad journal bearings—comparison between experimental data and theoretical results, [Text] " Journal of Tribology, vol. 119, no. 3, pp. 401-407, 1997.
10. I. Pierre and M. Fillon, "Influence of geometric parameters and operating conditions on the thermohydrodynamic behaviour of plain journal bearings, [Text] " Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, vol. 5, no. 214, pp. 445-457, 2000.
11. J. Bouyer and M. Fillon, "On the significance of thermal and deformation effects on a plain journal bearing subjected to severe operating conditions, [Text] " Journal of Tribology, vol. 126, no. 4, pp. 819-822, 2004.
12. S. B. Glavatskih and M. Fillon, "TEHD analysis of thrust bearings with PTFE-faced pads, [Text] " Journal of Tribology, vol. 128, no. 1, pp. 49-58, 2005.
13. M. W. S. Khonsari, "On the Fluid-Solid Interaction in Reference to Thermohydrodynamic Analysis of Journal Bearings, [Text] " J. of Tribology, vol. 113, no. 2, pp. 398-404, 1991.
14. C. Bouchoule, M. Fillon and D. Nicolas, "Thermal Effects in Hydrodynamic Journal Bearings Of Speed Increasing And Reduction Gearboxes,, [Text] " in Proceedings of the 24th Turbomachinery Symposium, pp. 85-95., 1995.
15. P. Tucker and P. Keogh, "A Generalized Computational Fluid Dynamics Approach for Journal Bearing Performance Prediction, [Text] " J. of Engineering Tribology, vol. 209, no. 2, pp. 99-108., 1995.
16. A. Chauhan, A. Singla, N. Panwar and P. Jindal, "CFD Based Thermo-Hydrodynamic Analysis of Circular Journal Bearing, [Text] " Journal of Advanced Mechanical Engineering, vol. 4, no. 5, pp. 475-482, 2014.
17. ANSYS User Manual, 2020.
18. ANSYS CFX-Pre User's Guide, 2020.

**Корнаева Елена Петровна,**канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры информационных систем и цифровых технологий ОГУ имени И.С. Тургенева, e-mail: lenoks\_box@mail.ru

**Майоров Сергей Владимирович,**канд. техн. наук, доцент кафедры мехатроники, механики и робототехники

**Фетисов Александр Сергеевич,**младший научный сотрудник НОЦ ИТМиДЭО ОГУ имени И.С. Тургенева

*\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_*

**CALCULATION OF JOURNAL BEARING CHARACTERISTICS UNDER CONDITIONS OF CONTROLLED THERMAL LUBRICANT PROPERTIES**

**Kornaeva E.P., Mayorov S.V., Fetisov A.S.**

*Russia, Orel, OSU named after I.S. Turgenev*

*The article presents the results of an experimental study on the influence of the characteristics of a grease at different temperatures on the characteristics of the journal bearing: the projection of the bearing reaction on the X, Y axes, the bearing friction moment. The data on the conceptual model of the bearing, the main equations, and the boundary conditions are given.*

***Keywords:*** *pressure-shear flow, misaligned cylinders, viscous fluid, convection, dissipation*

Bibliography

1. M. M. Khonsari, "A Review of Thermal Effects in Hydrodynamic Bearings Part II: Journal Bearings," [Text] ASLE Transactions, vol. 30, no. 1, pp. 26-33, 1986.
2. D. Dowson, J. D. Hudson, B. Hunter and C. N. March, "Paper 3: An Experimental Investigation of the Thermal Equilibrium of Steadily Loaded Journal Bearings, [Text] " in Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings, 1966.
3. H. McCallion, F. Yousif and T. Lloyd, "The Analysis of Thermal Effects in a Full Journal Bearing," [Text] Journal of Lubrication Technology, vol. 92, pp. 578-587, 1970.
4. J. Ferron, J. Frene and R. Boncompain, "A Study of the Thermohydrodynamic Performance of a Plain Journal Bearing Comparison Between Theory and Experiments, [Text] " Journal of Lubrication Technology, vol. 105, pp. 422-428, 1983.
5. Q. Chang, P. Yang, Y. Meng and S. Wen, "Thermoelastohydrodynamic analysis of the static performance of tilting-pad journal bearings with the Newton–Raphson method," [Text] Tribology International, vol. 35, no. 4, pp. 225-234, 2002.
6. J. L. Bishop and C. M. Ettles, "The Seizure of Journal Bearings by Thermoelastic Mechanisms, [Text] " Wear, vol. 79, no. 1, pp. 37-52, 1982.
7. P. K. P. Morton, "Thermoelastic Influences in Journal Bearing Lubrication, [Text] " Proc. Royal Soc. London A, Mathematical an dPhysical Sciences, vol. 403, pp. 111-134, 1986.
8. S. M. Rohde and K. P. Oh, "A Thermoelastohydrodynamic Analysis of a Finite Slider Bearing, [Text] " Journal of Lubrication Technology, vol. 97, pp. 450-460, 1975.
9. P. Monmousseau, M. Fillon and J. Frene, "Transient thermoelastohydrodynamic study of tilting-pad journal bearings—comparison between experimental data and theoretical results, [Text] " Journal of Tribology, vol. 119, no. 3, pp. 401-407, 1997.
10. I. Pierre and M. Fillon, "Influence of geometric parameters and operating conditions on the thermohydrodynamic behaviour of plain journal bearings, [Text] " Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, vol. 5, no. 214, pp. 445-457, 2000.
11. J. Bouyer and M. Fillon, "On the significance of thermal and deformation effects on a plain journal bearing subjected to severe operating conditions, [Text] " Journal of Tribology, vol. 126, no. 4, pp. 819-822, 2004.
12. S. B. Glavatskih and M. Fillon, "TEHD analysis of thrust bearings with PTFE-faced pads, [Text] " Journal of Tribology, vol. 128, no. 1, pp. 49-58, 2005.
13. M. W. S. Khonsari, "On the Fluid-Solid Interaction in Reference to Thermohydrodynamic Analysis of Journal Bearings, [Text] " J. of Tribology, vol. 113, no. 2, pp. 398-404, 1991.
14. C. Bouchoule, M. Fillon and D. Nicolas, "Thermal Effects in Hydrodynamic Journal Bearings Of Speed Increasing And Reduction Gearboxes,, [Text] " in Proceedings of the 24th Turbomachinery Symposium, pp. 85-95., 1995.
15. P. Tucker and P. Keogh, "A Generalized Computational Fluid Dynamics Approach for Journal Bearing Performance Prediction, [Text] " J. of Engineering Tribology, vol. 209, no. 2, pp. 99-108., 1995.
16. A. Chauhan, A. Singla, N. Panwar and P. Jindal, "CFD Based Thermo-Hydrodynamic Analysis of Circular Journal Bearing, [Text] " Journal of Advanced Mechanical Engineering, vol. 4, no. 5, pp. 475-482, 2014.
17. ANSYS User Manual, 2020.
18. ANSYS CFX-Pre User's Guide, 2020.

**Kornaeva Elena Petrovna**, Cand. physical-mat. Sci., Associate Professor of the Department of Information Systems and Digital Technologies, OSU named after I.S. Turgenev, e-mail: lenoks\_box@mail.ru

**Mayorov Sergey Vladimirovich**, Cand. tech. Sci., Associate Professor of the Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics

**Fetisov Alexander Sergeevich**, junior researcher, REC ITMiDEO OSU named after I.S. Turgenev