

УДК 621.822.187

Е.Ф. ПАРОВАЙ, В.Б. ГОРДЕЕВ, С.В. ФАЛАЛЕЕВ*Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), Россия*

РАСЧЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА ОПОРЫ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Эффективность современных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) во многом лимитируется ограниченными функциональными возможностями применяемых в них подшипников качения. Использование в ГТД подшипников скольжения «сухого картера» расширяет возможности для оптимизации ГТД. Однако в настоящее время не существует адекватной теории проектирования и методики расчета таких подшипников. В данной статье рассматриваются особенности моделирования и проектирования гидродинамических подшипников с использованием современных программных средств, таких как NX и ANSYS. Представлены результаты расчетов течения рабочей жидкости в зазоре подшипника в ANSYS CFX.

Ключевые слова: ANSYS CFX, гидродинамический подшипник, зазор, колодка, оптимизация, рабочая жидкость, распределение давлений.

Введение

Требования к надёжности подшипников и к динамическим характеристикам роторов постоянно ужесточаются, что заставляет искать альтернативу подшипникам качения, которые при больших окружных скоростях не могут иметь высоких ресурсных характеристик.

Опыт применения гидродинамических подшипников скольжения в современных ГТД говорит о целесообразности и необходимости нахождения и оптимизации технического решения конструкции подшипника, обеспечивающего максимальную экономическую эффективность. Подшипник скольжения «сухого картера» (ПССК) с расточкой вкладышей в радиус вала и силовым замыканием рабочего зазора является наиболее эффективным техническим решением данной задачи, так как обладает максимальными возможностями по обеспечению высоких эксплуатационных характеристик и функциональных свойств при низких требованиях к системе управления, источнику электроснабжения и низким расходом рабочей жидкости [1]. В результате расточки в радиус вала жидкостное трение (или —выход на клин) реализуется сразу с началом вращения вала. Мероприятием по исключению «колодочного флаттера» в условиях «сухого картера» и расточки в радиус вала является силовое замыкание рабочего зазора – принудительное нагружение всех вкладышей. Такой подшипник может работать без

принудительной подачи масла в маслораздаточные канавки (режим «масляного голодания»). В настоящее время, однако, не существует адекватной методики проектирования ПССК, учитывающей особенности их конструкции и максимально использующей современные расчетные средства. Более того, экспериментальная доводка ПССК проблематична из-за многочисленности факторов, определяющих их характеристики. Поэтому разработка достоверных методов расчёта является важнейшей составляющей при создании и развитии теории проектирования ПССК.

В Самарском государственном аэрокосмическом университете ведутся работы по созданию методики проектирования, расчета и технологии производства гидродинамических подшипников экономически эффективной конструкции, в том числе и ПССК.

1. Постановка задачи

В данной статье поставлена задача проектирования нового авиационного двигателя на гидродинамических подшипниках или замены подшипников качения на подшипники скольжения с целью модификации существующего авиационного двигателя. Также необходимо определить требуемые характеристики нового подшипника (величина и направление воспринимаемой нагрузки, геометрия опоры, эксплуатационные характеристики).

2. Выбор геометрии подшипника

Геометрические характеристики подшипника в первом приближении рассчитываются с использованием исходных данных, которыми являются эксплуатационные и геометрические характеристики двигателя (частота вращения ротора, диаметр вала ротора, нагрузка на подшипник, температура смазки на входе в подшипник и т.п.) и характеристики смазки (динамическая вязкость) [2]. Макрогеометрия подшипника определяется исходя из требований к маслосистеме, характеристикам ротора и геометрии опоры. Исходя из этих данных определяются геометрия маслораздаточной канавки, величина относительного зазора и значения коэффициентов нагруженности вкладышей.

3. Компьютерное проектирование

Проектирование с использованием современных программных средств позволяет получить 3-D модель подшипника с рассчитанными рабочими характеристиками, оптимизировать его геометрию в сравнительно короткие сроки, а также значительно сократить длительность доводки.

3.1. Расчет рабочих характеристик подшипника

Включает определение положений равновесия шейки вала и каждого из вкладышей, определения

равновесных углов поворота вкладышей (углы), а так же нагруженности и расхода смазки при заданной и в общем случае произвольной по направлению нагрузке на подшипник. На рис. 1 представлены результаты ручных (с использованием аналитических зависимостей) и программных расчетов.

3.2. Особенности задания граничных условий при расчёте характеристик ПССК

Любой расчет характеристик гидродинамического подшипника включает в себя решение дифференциальных уравнений Навье-Стокса при течении вязкой жидкости в тонких слоях [3].

В процессе исследований было выяснено, что существующие методики расчета и проектирования гидродинамических подшипников используют неприемлемые для ПССК граничные условия, которые не учитывают:

- свойств неразрывности смазки;
- свойств смачиваемости смазки;
- скоростного напора смазки;
- отсутствия барботажных потерь и потерь массообмена (теплообмена);
- отличия от нуля избыточного давления по периметру вкладышей.

3.3. Прочность колодки и демпфирование МР

Подвес вкладышей упорного и переднего опорного подшипников осуществляется на упругих

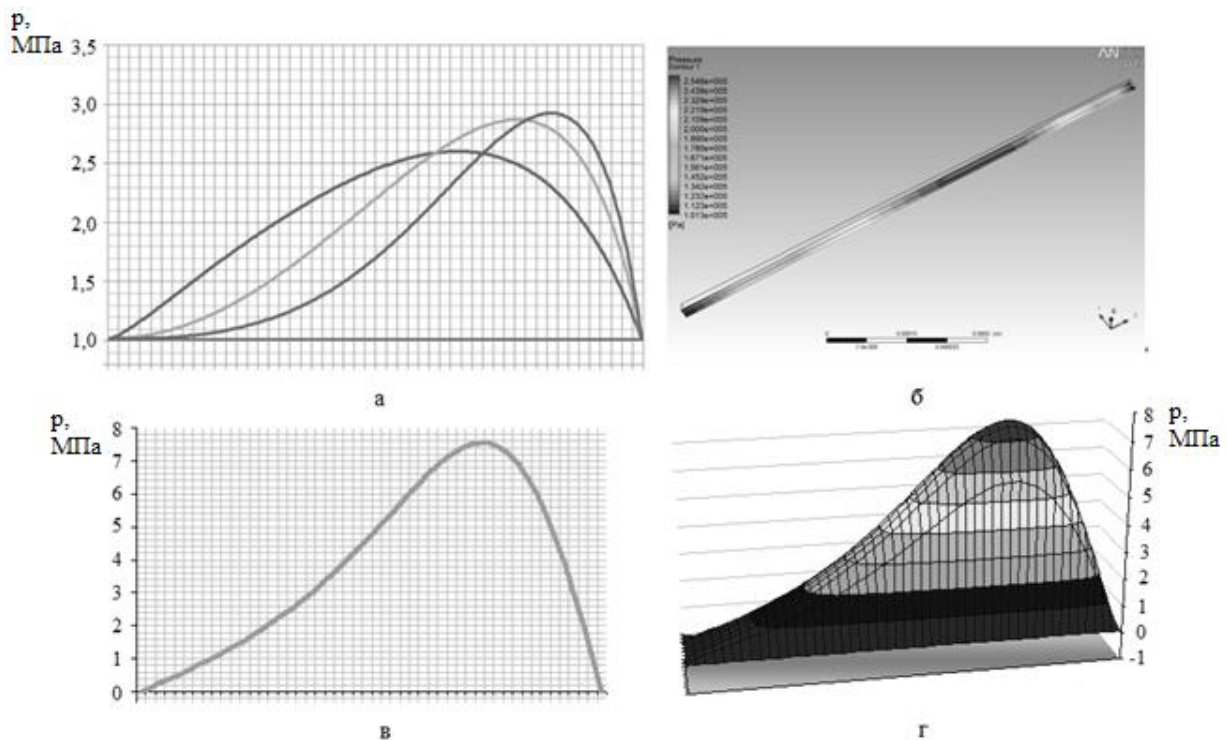


Рис. 1. Распределение давления по зазору гидродинамического подшипника (1 сегмент): а – при сужении зазора от 10 до 40 мкм (снизу вверх) в ANSYS CFX; б – ANSYS CFX; в – график, полученный ручным расчетом с применением аналитических зависимостей; г – 3D-график, полученный ручным расчетом с применением аналитических зависимостей

элементах из пористого упругодемпфирующего материала металлорезина (МР).

Анализ прочности колодки и определение характеристики подвеса осуществляется исходя из значения рабочей нагрузки на подшипник (веса ротора), удельных рабочих нагрузок на вкладыши подшипника, требуемого ресурса упругого подвеса вкладышей, температурного режима, требуемых демпфирующих свойств и свойств (характеристик) демпфирующего материала, работающего на сжатие в координатах σ - ε , где $\sigma = N/(ab)$ – напряжения сжатия на элемент демпфера в радиальном направлении, $\varepsilon = \Delta H / H$ – радиальная (нормальная) деформация элемента, а H – первоначальная толщина демпфера в радиальном направлении в ненагруженном состоянии; a , b – размеры поперечного сечения элемента.

Выражение для расчета любого процесса нагрузки подвеса с началом, лежащем на граничном процессе петли гистерезиса, имеет вид:

$$\sigma(\varepsilon, \varepsilon_0, \nu) = \sigma_{cp}(\varepsilon) + 0,5 \cdot (-1)^{\nu+1} \cdot \sigma_T(\varepsilon) + (-1)^\nu \cdot \sigma_T(\varepsilon) \cdot \exp\left[-5 \cdot \frac{|\varepsilon - \varepsilon_0|}{a_0(\varepsilon_0)}\right].$$

3.4. FSI расчеты

Fluid-Structure Interaction (FSI) – связь между анализом напряженно-деформированного состояния (ANSYS Mechanical / Multiphysics) и гидродинамическим расчетом (ANSYS CFX). В зависимости от постановки задачи применяется та или иная схема взаимодействия между решателями.

В случае гидродинамического подшипника FSI-расчеты будут включать:

- расчеты параметров потока смазки в узком зазоре подшипника (CFX, статика);
- расчет теплового и напряженно-деформированного состояния вкладышей подшипника;
- расчёт напряженно-деформированного состояния упругих элементов из МР (ANSYS Mechanical).
- гидродинамические расчеты параметров потока смазки в узком зазоре подшипника с учётом «всплывания» вала (CFX, динамика);
- расчёт напряженно-деформированного состояния вращающегося вала ротора (ANSYS Mechanical).

4. Оптимизация

На рис. 2 показан общий вид подшипника скольжения «сухого картера».

Традиционно в процессе оптимизации подшипника пропорционально варьируются длина и ширина масляного клина при постоянной нагрузке

P , окружной скорости (диаметре подшипника) V , гидродинамическом совершенстве клина G_u , вязкости масла μ , зависящей от температуры [4].

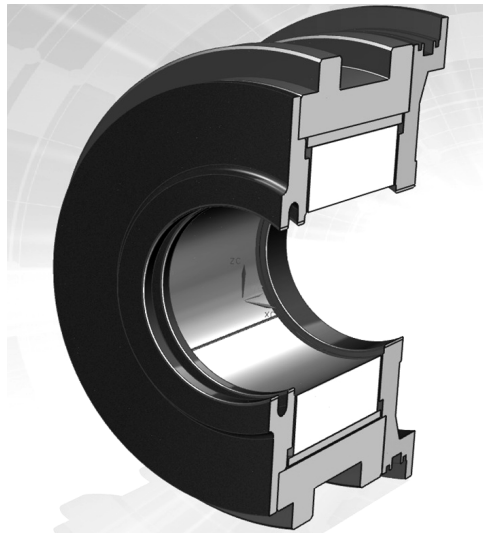


Рис. 2. 3D-модель ПССК в разрезе

Реальная оптимизация предполагает изменение всех параметров (в том числе и конструкции подшипника – количества и геометрии колодок, макрогеометрических характеристик, конструкции упругого подвеса), кроме тех, на которые наложены ограничения (например, диаметр подшипника, температура и вязкость выбранного масла, допускаемая материалом вкладышей удельная нагрузка и т.д.). Оптимизация подразумевает под собой изменение параметров подшипника и последующим за ним полным пересчётом рабочих характеристик.

Заключение

ПССК обладают существенными преимуществами по сравнению как с подшипниками качения, так и с гидродинамическими подшипниками известных конструкций. Это:

- значительно меньший расход смазывающей жидкости;
- упрощение конструкции опоры, в которой применяется ПССК;
- менее жесткие требования к системам управления и электроснабжения;
- динамическая устойчивость;
- высокая несущая способность и пр.

Уровень современных программных средств позволяет полностью автоматизировать процесс создания подшипника скольжения «сухого картера» при условии наличия мощной теоретической базы и четко сформулированной методики проектирования и производства.

На данный момент существуют первые наработки по созданию методики проектирования и производства подшипника скольжения «сухого картера», которые описаны в данной статье.

Направление дальнейших работ:

- программные расчеты динамических характеристик ПССК,
- проведение расчетных исследований с целью определения оптимальных геометрических параметров подшипника;
- расчетное сопровождение экспериментальных исследований,
- разработка и подробное описание методики проектирования и производства подшипника скольжения «сухого картера».

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Министерство образования и науки) на основании Постановления Правительства РФ № 218 от 09.04.2010.

Литература

1. Воскресенский, В.А. Расчет и проектирование опор жидкостного трения [Текст] / В.А. Воскресенский, В.И. Дьяков, А.З. Зиле. – М.: Машиностроение, 1983. – 232 с.
2. Гордеев, В.Б. Сегментные гидродинамические подшипники скольжения – сухого картера с расточкой вкладышей в радиус вала и упругим замыканием рабочего зазора [Текст] / В.Б. Гордеев. – Технический отчет №ТО-44-К-2007. – Самара: ОАО СКБМ, 2007. – 21 с.
3. Камерон, А. Теория смазки в инженерном деле [Текст] / А. Камерон. – М.: МашГИЗ, 1962. – 296 с.
4. Проектирование сегментных гидродинамических подшипников скольжения – сухого картера с расточкой вкладышей в радиус вала и силовым замыканием рабочего зазора [Текст]: технический отчет НИР: исполнитель ОАО СКБМ [и др.]. – Самара: ОАО СКБМ, 2008. – 133 с. – Инв. № ТО-44-К-2008.

Поступила в редакцию 29.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой теории двигателей летательных аппаратов В.Н. Матвеев, Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королёва, Россия.

РОЗРАХУНОК ГІДРОДИНАМІЧНОГО ПІДШИПНИКА ОПОРИ АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА

О.Ф. Паровай, В.Б. Гордеев, С.В. Фалалеев

Ефективність сучасних авіаційних ГТД лімітується обмеженими функціональними можливостями застосування у них підшипників ковзання. Використання в ГТД підшипників ковзання «сухого картера» розширює можливості для оптимізації ГТД. Проте на сьогодні не існує адекватної теорії проектування і методики розрахунку таких підшипників. У даній статті розглядаються особливості моделювання та проектування гідродинамічних підшипників з використанням сучасних програмних засобів, таких як NX і ANSYS. Представлені результати розрахунків течії робочої рідини в зазорі підшипника в ANSYS CFX.

Ключові слова: ANSYS CFX, гідродинамічний підшипник, зазор, колодка, оптимізація, робоча рідина, розподіл тисків.

CALCULATION OF THE AVIATION ENGINE'S HYDRODYNAMIC BEARING

Ye.F. Parovay, V.B. Gordeev, S.V. Falaleev

The efficiency of modern gas turbine engines is severely limited by bearings functionality. GTE "dry sump" sliding bearings expand the possibilities for turbine engine optimizing. However, there are no adequate design theory and calculation methodic of the bearing at present. This article describes the features of hydrodynamic bearings modeling and design using modern software such as NX and ANSYS. The results of calculations of flow hydraulic fluid in the bearing gap in ANSYS CFX are given.

Key words: ANSYS CFX, hydrodynamic bearing, gap, block, optimization, hydraulic fluid, the pressure distribution.

Паровай Елена Фёдоровна – инженер ОНИЛ-1 Самарского государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королёва, Россия, e-mail: selena_pa@mail.ru.

Гордеев Владимир Борисович – начальник отдела прочности ОАО «Кузнецов», Самара, Россия, e-mail: sntk@sntk.saminfo.ru.

Фалалеев Сергей Викторович – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов» Самарского государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королёва, Россия, e-mail: kipdla@sau.ru.