

УДК 621.822.187

Е. Ф. Паровай

*Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева
(национальный исследовательский университет), Россия*

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОНКИХ СЛОЕВ СМАЗКИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В данной статье описываются особенности конечно-элементного моделирования тонких слоев смазки с помощью современных программных средств, таких как ANSYS APDL, ANSYS CFX и ICEM CFD. Раскрыта суть основных проблем, возникающих при разбиении моделей узких зазоров на конечные элементы. Приведены достоинства и недостатки программных модулей при работе с малыми зазорами. Показаны пути решения сложностей, возникающих при конечно-элементном моделировании, в частности, проблемы «схлопывания» конечных элементов и проблемы плохой сходимости расчетов в различных модулях ANSYS. Сделаны выводы о методах повышения качества сетки конечных элементов. Описаны направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: ANSYS APDL, ICEM CFD, гидродинамический подшипник, зазор, конечный элемент, пристеночный слой, свободная сетка, «схлопывание», сходимость, упорядоченная сетка.

Введение

В настоящее время при проектировании изделий авиационного назначения, в частности гидродинамических подшипников, применяются программные системы конечно-элементного (МКЭ) анализа. Подготовка модели к расчету в таких системах представляет собой наложение на модель сетки конечных элементов требуемых формы и размера.

1. Особенности разбиения моделей узкого зазора на конечные элементы

При создании моделей узких зазоров различной геометрии (двухмерных, трехмерных, со стабилизирующими областями, с маслораздаточной канавкой и форсункой подвода смазки, без явного подвода смазки, зазора между одной колодкой ПССК и валом и полного кругового зазора в подшипнике и т.д.) приходится сталкиваться с проблемами по разбиению моделей на конечные элементы (создание сетки).

Причинами таковых проблем являются:

1) *слишком малая величина моделируемого зазора (от 5 мкм).* В виду того, что в работе рассчитываются ультразвукие зазоры, большинство встроенных Mesh-редакторов (в ANSYS CFX – CFX-Mesher) воспринимали предложенную для разбиения геометрию неадекватно. В результате сетка КЭ на зазоре «схлопывалась», искривлялась, создавая остроугольные элементы (неприемлемого качества, что в лучшем случае резко снижает точность расчета, а обычно делает расчет невозможным), или вовсе не накладывалась.

2) *необходимость наложения упорядоченной сетки на зазор.* Еще одну сложность при разбиении моделей зазора сеткой конечных элементов вызывает необходимость создания упорядоченной сетки. CFX-Mesher был не в состоянии накладывать упорядоченную сетку на зазор столь малой величины, что особенно хорошо иллюстрировалось при попытках создания объемного разбиения на элементы.

3) *обусловленная требованиями гидродинамики форма конечного элемента.* Модель зазора для гидродинамических расчетов должна быть разбита элементами определенной формы для того, чтобы результат расчета был достаточно высокой точности. Это форма прямоугольного параллелепипеда (гексаэдра).

Кроме того, для удовлетворительных результатов расчета необходимо соблюдать отношение сторон КЭ до 1 к 20...100.

Чем сложнее геометрия модели, тем хуже она поддается разбиению элементами такой формы.

В случае зазора шириной от 5 мкм было трудно создавать сетку КЭ на зазоре не такой сложной формы, как очень малого размера.

4) *сравнительно большое количество конечных элементов по ширине зазора.* Опять же, для удовлетворительной точности расчета необходимо разбиение зазора на 8 и более КЭ по толщине. В некоторых моделях использовалось разбиение зазора в 5 мкм на 16...20 элементов (следовательно, высота одного КЭ была менее 0,25 мкм).

5) *сгущение сетки (пристеночный слой).* Сгущение сетки зазора необходимо для расчетного

фиксирования явления отрыва потока от стенки зазора (в пристеночном слое, где изменения параметров течения наиболее заметные), и, в результате, для повышения точности расчетов.

б) *общее высокое качество сетки.* Само собой, точность любого программного расчета зависит от количества конечных элементов, на которые модель разбита. В свою очередь, с увеличением числа КЭ заметно возрастает и время расчета. Кроме того, точность напрямую зависит от качества конечных элементов – разбитая свободной сеткой модель не даст достоверного описания процессов, происходящих в ней, особенно, если это модель течения жидкости в узком зазоре подшипника скольжения.

При проведении ряда расчетов моделей с различным качеством конечных элементов было замечено, что существует зависимость между качеством сетки КЭ в модели и сходимостью программного расчета. Это значит, что при различном качестве сетки график сходимости расчета протекает по-разному.

Условием сходимости расчета принято считать снижение всех графиков рассчитываемых характеристик модели ниже уровня 10^{-4} . При плохом качестве сетки КЭ так называемая сходимость расчета может быть не достигнута. На рис. 1 показаны графики, полученные в процессе расчета одной из моделей узкого зазора.

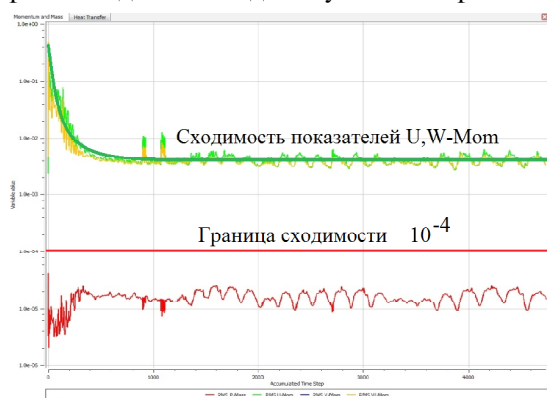


Рис. 1. Пример несходимости расчета в связи с низким качеством сетки КЭ

7) *сочетание свободной (неупорядоченной, нерегулярной) сетки на областях стабилизаторов с упорядоченной сеткой зазора.* Эта особенность привела к необходимости разбиения поверхностей модели на более мелкие области, описывающие изменения геометрии модели – переходы зазора в области стабилизаторов, выход смазки из подводящей форсунки в маслораздаточную канавку, а затем в рабочий зазор и т.д. Что, в свою очередь, обязало создать качественные сопряжения упорядоченной и неупорядоченной (свободной) сеток между отдельными элементами модели.

2. Создание сетки конечных элементов в ICEM CFD

ICEM CFD – программный модуль ANSYS, представляющий собой мощный генератор сетки конечных элементов.

При разбиении модели гидродинамического подшипника в ICEM CFD создавалась блочная структура для получения сгущающейся гексаэдрической сетки в узком зазоре и O-сетка для пристеночного слоя системы подвода смазки (маслораздаточная канавка, форсунка). На рис. 2. представлена КЭ-модель зазора гидродинамического подшипника, созданная с помощью ICEM CFD.

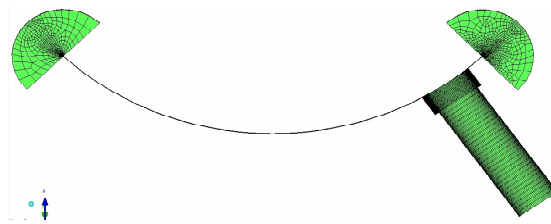


Рис. 2. Модель зазора сегментного гидродинамического подшипника в ICEM CFD (при рассмотрении одной колодки)

При таких достоинствах сеточного генератора ICEM CFD, как возможность работы с любой геометрией и легкость создания и связывания любых видов конечных элементов, имел место существенный недостаток – элементы в узком зазоре «схлопывались», что заставило воспользоваться модулем ANSYS APDL для разбиения области зазора.

3. Создание сетки конечных элементов в ANSYS APDL

ANSYS APDL отличается тем, что в нем можно наложить практически любую сетку конечных элементов на модель любой геометрии, как двухмерную, так и трехмерную. Это оказалось очень выгодным при наложении сетки на большинство расчетных моделей, описываемых в данной дипломной работе, так как их геометрия включает в себе несколько особенностей, которые могут неадекватно восприниматься другими программами по разбиению моделей на конечные элементы. Такими особенностями являются:

- 1) слишком малая величина моделируемого зазора (от 5 мкм);
- 2) необходимость наложения упорядоченной сетки на зазор;
- 3) обусловленная требованиями гидродинамики форма конечного элемента;
- 4) сравнительно большое количество элементов по толщине зазора;
- 5) сгущение сетки у краев зазора (пристеночный слой);

б) сочетание свободной (неупорядоченной, нерегулярной) сетки на областях стабилизаторов с упорядоченной сеткой зазора.

Полная модель подшипника (рис. 3) представляет собой 3D-модель зазора (зазоры между колодками и валом, между колодками) и стабилизирующих областей, введенных во избежание вихрей и обратных токов, заметно искажающих результаты расчетов).

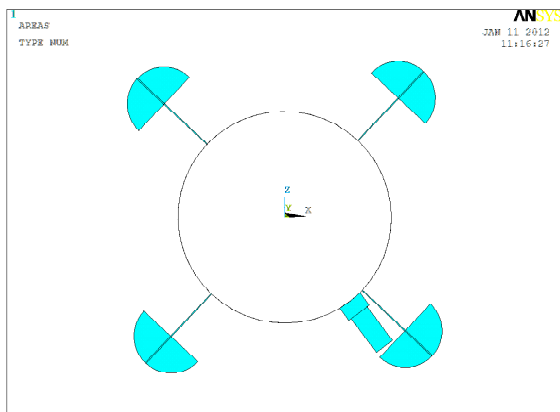


Рис. 3. Модель зазора сегментного гидродинамического подшипника

Модель подшипника является параметрической по смещению вала относительно колодок, который задается переменной эксцентриситета *smesh* («смещение»).

Первоначально модель создается с эксцентриситетом вала *smesh* = 0 (для первого расчета). Затем следующие модели для исследования зависимости распределения давлений по зазору от смещения вала получаются путем изменения величины *smesh* в log-файле.

На рис. 4 показана поверхностная свободная сетка (неупорядоченная, free-сетка) на областях стабилизатора потока смазки. Такой вид сетки может применяться для разбиения больших добавочных объемов, значения параметров потока внутри которых маловажны или не представляют практического интереса.

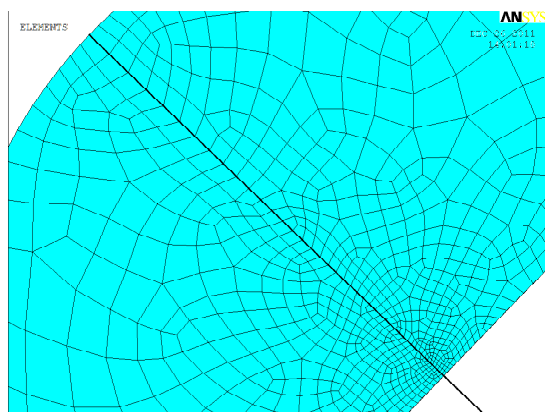


Рис. 4. Сетка области стабилизатора

На рис. 5 показана упорядоченная сетка с пристеночным слоем (сгущением), наложенная на 5-микронный зазор.

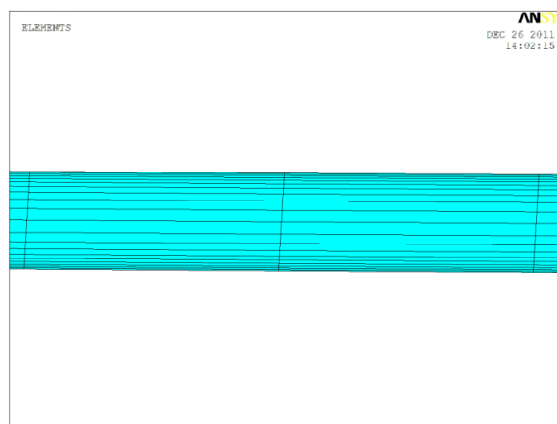


Рис. 5. Сетка области зазора

Форма и количество конечных элементов в модели учитывают требования гидродинамики.

Заключение

Конечно-элементное моделирование тонких слоев смазки обладает рядом особенностей, которые необходимо учитывать при наложении на них сетки конечных элементов.

Только оперируя моделью с достаточно высоким качеством сетки конечных элементов, можно судить о результатах ее расчета, как о достоверных, то есть качественно и точно описывающей процессы течения жидкости.

Повысить качество сетки, разбивающей модель узкого зазора на конечные элементы, можно учитывая следующие особенности:

- 1) обусловленная требованиями гидродинамики форма конечного элемента;
- 2) количество конечных элементов по ширине зазора не менее 9;
- 3) сгущение сетки (пристеночный слой);
- 4) общее высокое качество сетки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) 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. — 232с.
2. Сегментные гидродинамические подшипники скольжения сухого картера с расточкой вкладышей в радиус вала и упругим замыканием ра-

бочего зазора: технический отчет №ТО-44-К-2007. - Самара: ОАО СКБМ; исполн. В.Б. Гордеев. – 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 сило-

вым замыканием рабочего зазора [Текст]: техн. отчет НИР: испол. ОАО СКБМ [и др.]. – Самара: ОАО СКБМ, 2008. – 133 с. – Инв. № ТО-44-К-2008.

5. Справочник по триботехнике: В 3 т. Т.2: Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения [Текст]/под ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1990. – 416 с.

Поступила в редакцию 29.05.2012

Е.Ф. Паровой. Кінцево-елементне моделювання тонких шарів мастила гідродинамічного підшипника авіаційного двигуна

У даній статті описуються особливості кінцево-елементного моделювання тонких шарів мастила за допомогою сучасних програмних засобів, таких як ANSYS APDL, ANSYS CFX і ICEM CFD. Розкрито суть основних проблем, що виникають при розбитті моделей вузьких зазорів на кінцеві елементи. Наведено переваги і недоліки програмних модулів при роботі з малими зазорами. Показані шляхи вирішення складностей, що виникають при кінцево-елементному моделюванні, зокрема, проблеми «схлопування» кінцевих елементів і проблеми поганій збіжності розрахунків у різних модулях ANSYS. Зроблено висновки про методи підвищення якості сітки кінцевих елементів. Описано напрямки подальших досліджень.

Ключові слова: ANSYS APDL, ICEM CFD, гідродинамічний підшипник, зазор, кінцевий елемент, пристінковий шар, вільна сітка, «схлопування», збіжність, упорядкована сітка.

Ye.F. Parovay. Final-element modeling of thin lubricating layers of aviation engine's hydrodynamic bearing

In this article are described features of final-element modeling of thin lubricating layers by means of modern software, such as by ANSYS APDL, ANSYS CFX and ICEM CFD. The essence of the main problems arising at narrow gaps models splitting on final elements is opened. Advantages and disadvantages of program modules at work with small gaps are given. Solutions of the difficulties arising at final-element modeling are shown, in particular, problem of final element zero thickness and problem of calculations bad convergence in various ANSYS modules. Conclusions about methods of mesh quality improvement are drawn. The directions of further researches are described.

Key words: ANSYS APDL, ICEM CFD, hydrodynamic bearing, gap, near-a-wall layer, free mesh, final element zero thickness, convergence, ordered mesh.