

УДК 621.452.3

А.С. ВИНОГРАДОВ, А.С. ЧАЛКИН, Д.Ф. ШАКИРОВ

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

РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОРЦОВОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО УПЛОТНЕНИЯ В ОПОРЕ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Приводится расчет экспериментальных данных по разрушению уплотнительного кольца при вибрационном нагружении. Осуществляется сравнение расчетных динамических моделей для пары трения торцового газодинамического уплотнения. Показано, что для исследования динамических характеристик двухмассовая модель является достаточной. Для основных расчетных режимов было определено изменение уплотнительного зазора. На основании созданной динамической модели были исследованы изменения величины зазора от частоты вращения при различных величинах жёсткости и коэффициента демпфирования воздушного слоя при линейных и угловых колебаниях.

Ключевые слова: торцовое газодинамическое уплотнение, вибрационное нагружение уплотнительного кольца, изменение уплотнительного зазора, жесткость и коэффициент демпфирования воздушного слоя.

Введение

Повышение эффективности газотурбинных двигателей при одновременном снижении их массы, габаритов и стоимости неразрывно связано, в том числе, с необходимостью увеличения частоты вращения роторов. Однако с увеличением частоты вращения стремительно возрастает уровень вибрации роторов, что снижает их надёжность. Даже кратковременные выходы их за допустимые пределы часто приводят к разрушению подшипников, потере работоспособности уплотнений, поломкам самих роторов и другим опасным авариям [1 – 3].

Значительная часть повреждений в уплотнениях происходит в результате возникновения в них опасной вибрации. Поэтому очень важно иметь представление о том, как ведет себя уплотнение при переходе с режима на режим двигателя. В работе исследовалось газодинамическое уплотнение как одно из наиболее перспективных для применения в современных двигателях. Работа такого уплотнения должна быть особенно тщательно смоделирована на этапе проектирования. Поскольку, при изменении режима параметры двигателя существенно меняются, возникновение опасных колебаний в уплотнении могут привести к непредсказуемым последствиям, вплоть до разрушения. На рис. 1 показано разрушение колец пары трения торцового газодинамического уплотнения которое имело место из-за осевых колебаний ротора.

В настоящее время известно несколько моде-

лей торцового газодинамического уплотнения (ТГДУ).

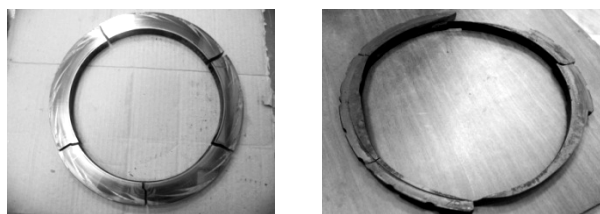


Рис. 1. Разрушение графитового и твёрдосплавного колец нагнетателя НЦ-25

Проведённый анализ по методике, изложенной в работе [1], показал, что для частот вращения, характерных для существующих ГПА, кинематического отрыва втулок от торца ротора не произойдёт. Поэтому для практических случаев достаточно рассмотрения ТГДУ в виде двухмассовой модели с параметрами, изображёнными на рис. 2. В литературе анализ такой модели с рассматриваемыми перемещениями отсутствует.

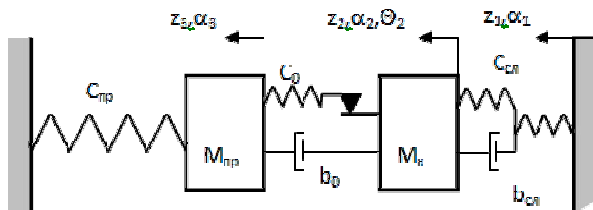


Рис. 2. Двухмассовая динамическая модель ТГДУ

Анализ величин перекрёстных коэффициентов жёсткости и демпфирования [1] показал, что в рассматриваемой двухмассовой модели (рис. 2) на практике могут быть реализованы следующие виды колебаний: осевые колебания $z1 \rightarrow z2 \rightarrow z3$; угловые колебания $\alpha1 \rightarrow \alpha2 \rightarrow \alpha3$; совместные осевые и угловые колебания $z1 \rightarrow z2, \theta2 \rightarrow z3$. Созданная модель и методика исследования позволяют изучить работу уплотнения при различных видах колебаний.

1. Объект исследования

За основу исследования была взята опора авиационного ТРДДФ, а в качестве исследуемого уплотнения было выбрано уплотнение в составе средней опоры компрессора (рис. 3). В штатной компоновке в данной опоре установлено классическое радиально-торцовое контактное уплотнение (РТКУ). В работе же исследовалось ТГДУ, как перспективное уплотнение для опоры компрессора.

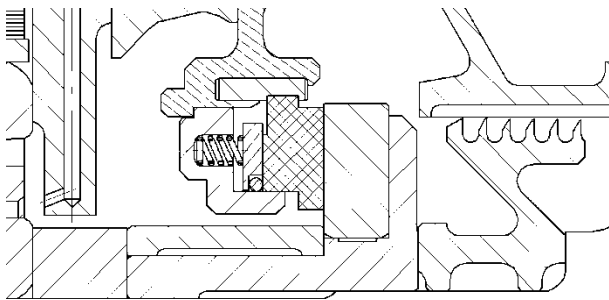


Рис. 3. Торцовое газодинамическое уплотнение в опоре компрессора авиационного двигателя

Особенностью работы данного уплотнения является сохранение зазора на всех режимах работы. Однако, возникающие колебания могут привести к контакту колец. Чтобы спрогнозировать работу уплотнения необходимо выполнить совместные расчеты динамических характеристик и деформации от силовых факторов.

2. Методология исследования

Для того чтобы провести анализ с учетом многорежимности, необходимо задаться полётным циклом двигателя. Данный цикл имеет все основные режимы: малый газ, максимальный, максимальный форсажный и два крейсерских режима.

Для того чтобы спрогнозировать, как будет деформироваться уплотнительное кольцо на всех режимах, необходимо сначала оценить влияние температуры, сил давления и собственно режима работы (частоты вращения ротора) на напряженно-деформированное состояние сопряженных деталей

двигателя (опоры, ротора, узла уплотнения).

Для определения необходимых значений температуры деталей проводится тепловой расчет. Исходными данными для этого расчета являются параметры газового потока во всех контрольных сечениях.

Определение температуры и коэффициентов конвективной теплоотдачи может осуществляться с помощью программных комплексов, рассчитывающих параметры теплового состояния.

После расчета в программе теплового состояния полученные результаты (параметры газового потока) передаем в программный комплекс на основе метода конечных элементов ANSYS для решения термической задачи. Расчет температурного состояния деталей двигателя осуществлялся на всех указанных режимах работы двигателя.

Полученные в результате термического расчета в ANSYS значения температур стенок передаются вновь в программу расчета теплового состояния для уточнения параметров воздушного потока. И весь цикл повторяется заново до тех пор, пока не получим температуры стенок с заданной точностью. Для достижения заданной точности может потребоваться до пяти итераций.

После всего этого необходимо оценить деформации от температуры, сил давления и режима работы двигателя. Для этого модель передается в модуль структурного расчета ANSYS, где нагружаем модель дополнительно к температуре силами давления и частотой вращения (для ротора компрессора).

Затем рассматривается влияние различных факторов на напряженно-деформированное состояние уплотнительного узла и, как следствие, на его основные параметры (утечки, уплотнительный зазор). Пример расчета деформированного состояния зазора при приложении температуры, сил давления показан на рис. 4.

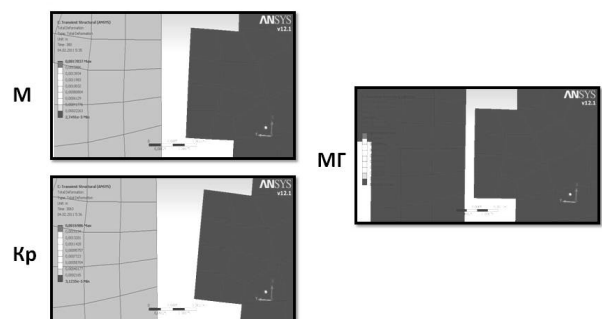


Рис. 4. Зависимость деформации уплотнительного зазора от режима работы двигателя

Минимальное значение зазора было получено на режиме малого газа. Наибольшее значение соот-

ветствует крейсерскому бесфорсажному режиму. Соответственно изменяются утечки через уплотнение (рис. 5).

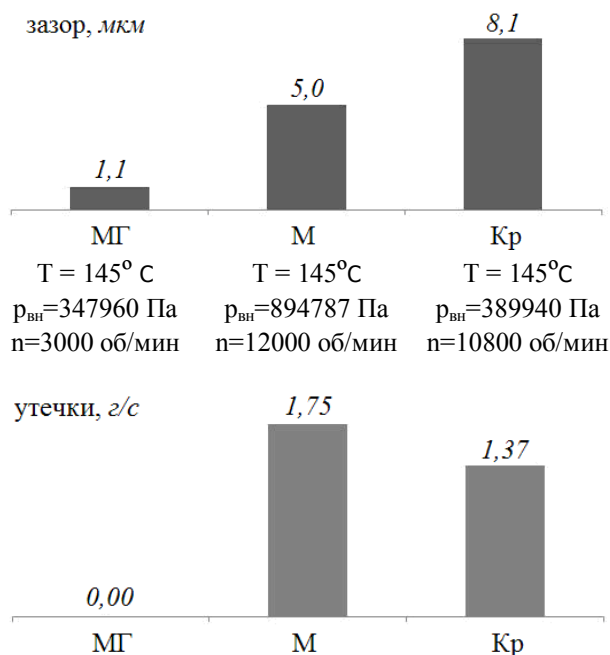


Рис. 5. Зависимость зазора и утечек от давления, температуры и режима работы двигателя

3. Результаты исследования

На основании динамической модели ТГДУ (рис. 2) была создана трехмерная модель в программном комплексе ADAMS. С ее помощью было исследовано изменение величины зазора при различных частотах и при различных амплитудах. Созданная модель позволяет также анализировать взаимное влияние жесткости смазочного слоя, коэффициента демпфирования на величину уплотнительного зазора (рис. 6, 7).

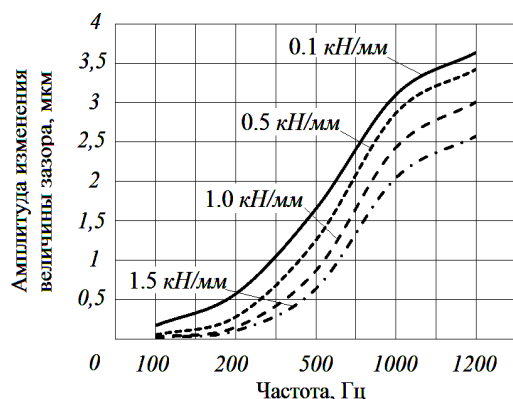


Рис. 6. Зависимость изменения величины зазора от частоты при различных величинах жесткости

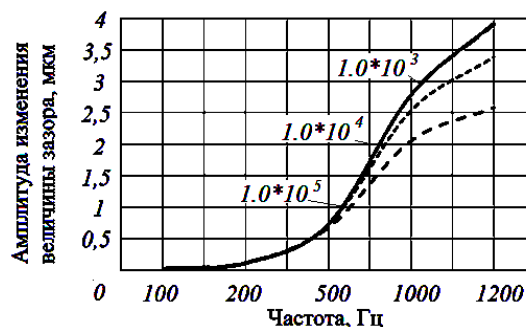


Рис. 7. Зависимость изменения величины зазора от коэффициента демпфирования воздушного слоя

Ротор двигателя имеет возможность совершать колебания не только вдоль оси (в связи с зазорами в подшипнике), но и угловые колебания за счет прогиба под действием различных факторов (рис. 8).

Предложенная модель позволяет объединить ее с другими моделями, определяющими напряженно-деформированное состояние. Ее применение для расчетов делает возможным представление вибрационных процессов в ТГДУ, важных с точки зрения обеспечения заданного ресурса.

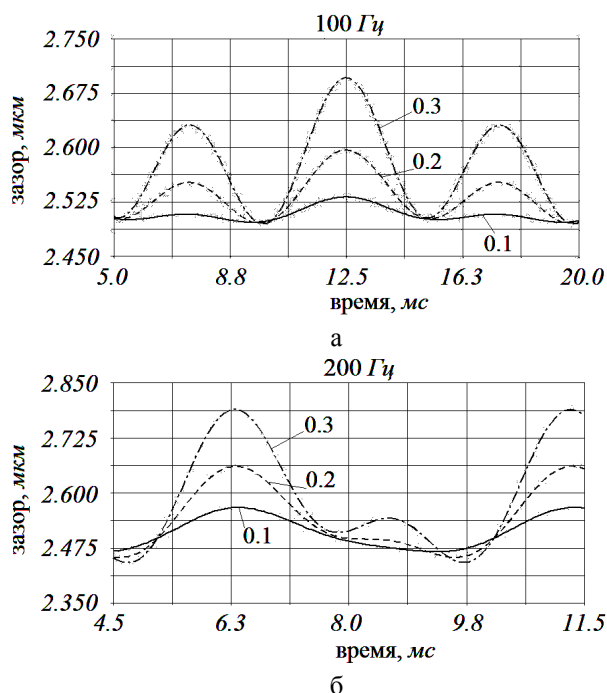


Рис. 8. Изменение величины зазора при линейных и угловых колебаниях с частотами: а – 100 Гц; б – 200 Гц, при значениях амплитуды: 0,1; 0,2; 0,3 мм

Заключение

Выполнение работ по данному методу делает возможным выполнение исследований ТГДУ на переходных режимах с учетом теплового состояния

частей двигателя (как статорных, так и роторных), оценку влияния характеристик уплотнения на КПД двигателя и удельные параметры, а также создание анимационной математической модели поведения уплотнения при переходе с режима на режим. Дальнейшее развитие проектирования торцового уплотнения на переходных режимах связано с совместным расчётом деформаций деталей уплотнения и его амплитудно-частотных характеристик, реализованных в рамках единого алгоритма. Это сделает возможным исследование нестационарных трёхмерных деформаций уплотнительных колец и расчёт уточнённых характеристик уплотнения: жёсткости смазочного слоя, изгибающего момента и минимального зазора для всей номенклатуры применяющихся режимов.

Литература

1. Фалалеев, С.В. Торцовые бесконтактные уплотнения двигателей летательных аппаратов [Текст]: учеб. пособие / С.В. Фалалеев, Д.Е. Чегодаев. – М.: Изд-во МАИ, 1998. – 276 с.
2. Белоусов, А.И. Конструкция и проектирование уплотнений вращающихся валов турбомашин двигателей летательных аппаратов [Текст]: учеб. пособие / А.И. Белоусов, В.А. Зрелов. – Куйбышев: КуАИ, 1989. – 104 с.
3. Фалалеев С.В. Динамические характеристики торцового газодинамического уплотнения в газоперекачивающем агрегате с магнитным подвесом [Текст] / С.В. Фалалеев, В.В. Седов // Газотурбинные технологии. – 2009. – № 3. – С. 34 – 37.

Поступила в редакцию 29.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ТДЛА В.Н. Матвеев, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет), Самара, Россия.

РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОРЦЕВОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО УЩІЛЬНЕННЯ В ОПОРІ АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА

О.С. Віноградов, О.С. Чалкін, Д.Ф. Шакиров

Надано розрахунок експериментальних даних щодо руйнування кільця, яке ущільнює, при його вібраційному навантаженні. Здійснено порівняння розрахункових динамічних моделей для пари тертя торцевого газодинамічного ущільнення. Наведено, що для дослідження динамічних характеристик двохмасова модель є достатньою. Для основних розрахункових режимів було визначено зміну зазору, що ущільнює. На підставі створеної динамічної моделі були досліджені зміни величини зазору від частоти обертання при різних величинах жорсткості і коефіцієнта демпфування повітряного шару при лінійних і кутових коливаннях.

Ключові слова: торцеве газодинамічне ущільнення, вібраційне навантаження кільця, що ущільнює, зміна зазору, що ущільнює, жорсткість і коефіцієнт демпфування повітряного шару.

A CALCULATION OF DYNAMIC DESCRIPTIONS OF FRONTAL GAS-DYNAMIC RETAINER IS IN SUPPORT OF AVIATION ENGINE

A.S. Vinogradov, A.S. Chalkin, D.F. Shakirov

It is reduced the analytical prediction of the empirical data about breaking down of sealing rings as a result of vibro-steady loading. It is being carried out the collation estimated vibration models for the friction pair of frontal gas-dynamic retainer. It's testified that the double-mass model is almost sufficient for the frequency-response analysis. It is also been determined the mutation of seal spacing for the main design modes. Based upon created vibration model there were searched out seal spacing excursions versus rotating frequency in the course of different rates of toughness and damping factor of an air bed Interference with in-line or angular vibrations.

Key words: frontal gas-dynamic retainer, vibro-steady loading of sealing ring, mutation of seal spacing, toughness and damping factor of an air bed.

Виноградов Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет), Самара, Россия, e-mail: a.s.vinogradov@list.ru.

Чалкин Александр Сергеевич – аспирант кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет), Самара, Россия, e-mail: kipdla@ssau.ru.

Шакиров Джагиль Фаридович – студент факультета двигателей летательных аппаратов (ДЛА) Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет), Самара, Россия, e-mail: jalile.13@gmail.com.