

УДК 621.452.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТОРЦЕВОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО УПЛОТНЕНИЯ ОПОРЫ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ДЕФОРМАЦИИ КОЛЕЦ ПАРЫ ТРЕНИЯ

© 2013 А.С. Виноградов, Е.С. Горячкин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 02.12.2013

В статье рассматриваются результаты расчетного определения характеристик уплотнения опоры авиационного двигателя. Расчет характеристик выполнен с учетом деформаций уплотнительного кольца. Проведен сравнительный анализ результатов расчета с учетом деформации колец и без. Ключевые слова: деформации, уплотнение, жесткость, утечки, зазор, частота вращения.

В настоящее время, одной из наиболее актуальных задач авиационного двигателестроения является повышение эффективности газотурбинных двигателей. Один из возможных путей достижения этого – снижение утечек рабочего тела в зазоре между вращающимися роторными и неподвижными статорными деталями. Известно несколько видов уплотнений, применяемых в опорах авиационных двигателей. Одним из наиболее эффективных является торцевое газодинамическое уплотнение [1]. Однако для данного типа уплотнения существует возможность выбора зазора под действием различных сил с последующим касанием ротора о статор, что может привести к разрушению уплотнительных колец и выходу двигателя из строя.

В процессе полета при взлете, наборе высоты, полете на крейсерской высоте, сбросе высоты, различных эволюциях самолета значение потребной тяги изменяется в широких пределах. Изменение тяги авиационного двигателя осуществляется за счет изменением режима его работы (путем изменения расхода топлива в основной и форсажной камерах сгорания, площадей характерных сечений), что сопровождается изменением частоты вращения ротора, нагрузок, действующих на детали уплотнения.

Набор основных режимов, типичный для современных двигателей с форсажной камерой приведен в табл. 1 [2].

В работе исследовано торцевое бесконтактное газодинамическое уплотнение, смоделированное двухмассовой моделью [3]. Расчетная модель, представленная на рис. 1, состоит из неподвижного статорного кольца 1, прижимного кольца 2, гра-

фитового кольца 3, роторного кольца 4. Кольца соединены между собой набором пружин 5, обладающих жесткостью и демпфированием.

При изменении режима работы двигателя меняется частота вращения ротора. От ее величины зависят давление и температура в сечениях двигателя – главные факторы, влияющие на работу уплотнения. На рис. 2 приведено значение утечек через зазор уплотнения в зависимости от частоты вращения при одном неизменном параметре. Расчет произведен в программе TORZS, разработанной на кафедре конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов СГАУ им. академика С.П. Королева [4].

Расход утечек, через уплотнение определен по формуле:

$$m = \frac{1}{12\mu} \int_0^{2\pi} \left[\rho r h^3 (r, \phi) \frac{dp}{dr} \right]_{r=r_1} d\phi.$$

Анализ рис. 2 показал, что изменение давления и температуры уплотняемой среды оказывает противоречивое влияние на величину утечек через зазор уплотнения: при повышении давления уплотняемой среды величина утечек повышается, при повышении температуры уплотняемой среды величина утечек снижается. Увеличение частоты вращения ротора приводит к росту, как давления, так и температуры уплотняемой

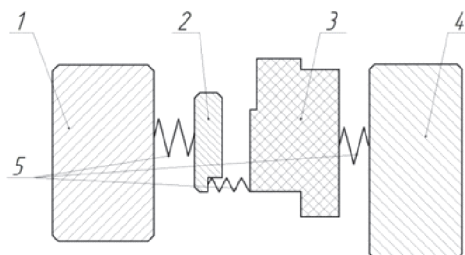


Рис. 1. Расчетная модель торцевого газодинамического уплотнения

Виноградов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент. E-mail: a.s.vinogradov@list.ru
Горячкин Евгений Сергеевич, магистрант.
E-mail: evgeni0063@yandex.ru

Таблица 1. Основные эксплуатационные режимы двигателя с форсажной камерой

Режим работы	$n_{HD}, \%$	$n_{ВД}, \%$	$R, \text{ кгс}$	$C_{y0}, \text{ кг/кгсч}$	$G_B, \text{ кг/с}$
полный форсированный	99_{-2}^{+1}	$100_{-1}^{+0,5}$	12500	$\leq 1,92 \pm 0,04$	121_{-2}^{+1}
минимальный форсированный	99_{-2}^{+1}	$100_{-1}^{+0,5}$	≤ 8450	$\leq 0,93 \pm 0,02$	121_{-2}^{+1}
максимальный	99_{-2}^{+1}	$100_{-1}^{+0,5}$	$7770 \pm 2\%$	$\leq 0,75 \pm 0,02$	121_{-2}^{+1}
крейсерский	-	85-90	3300-4200	$\leq 0,67 \pm 0,02$	-
малый газ	-	70 ± 2	≤ 250	-	-

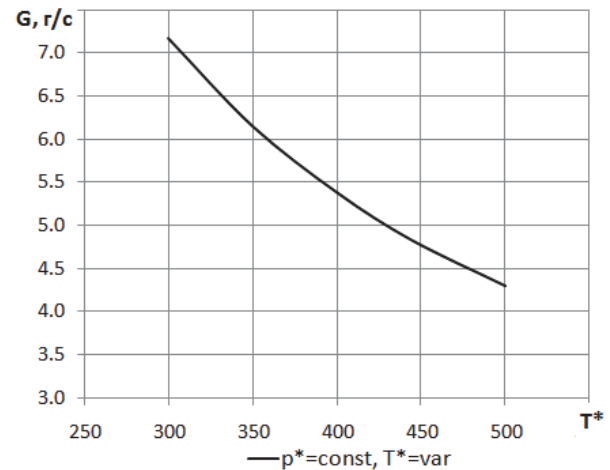
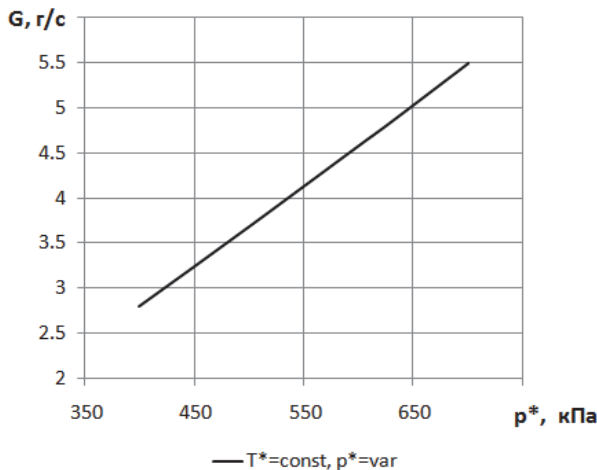


Рис. 2. Влияние значения давления и температуры уплотняемой среды на величину утечек

среды. Что свидетельствует о необходимости анализировать совместное влияние этих факторов.

В процессе работы, под действием давления, уплотнительное графитовое кольцо деформируется, что приводит к изменению величины утечек через зазор. Для учета данного влияния был проведен цикл итерационных расчетов с совместным использованием программ TORZS и конечно-элементного комплекса ANSYS. Алгоритм расчета представлен на рис. 3.

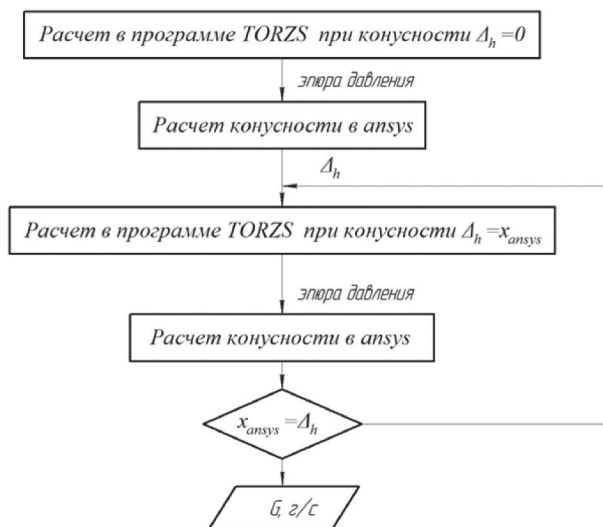


Рис. 3. Алгоритм расчета величины утечек с учетом деформаций графитового кольца

Геометрически деформированное состояние, определенное в программе TORZS, характеризуется (рис. 4): величиной начального зазора h_0 , значением минимального зазора h_{min} , величиной конусности Δh .

В программе TORZS был произведен расчет уплотнения при нулевой конусности. Полученная эпюра давления была передана в конечно-элементный комплекс ANSYS. Итерационным расчетом было достигнуто такое значение конусности в программе TORZS, которая совпадает с рассчитанным значением в ANSYS.

Каждый из режимов работы двигателя характеризуется значением частотой вращения рото-

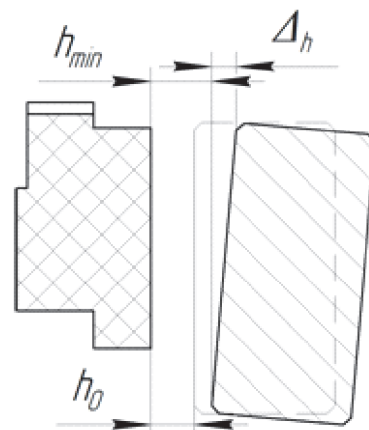


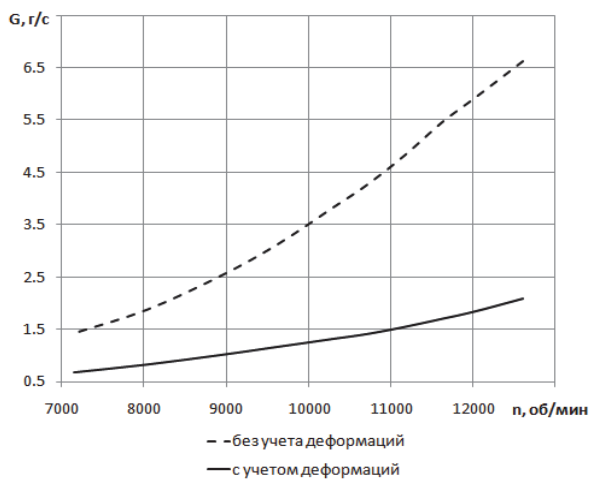
Рис. 4. Геометрия деформированного уплотнения

ра, величиной давления и температуры в проточной части.

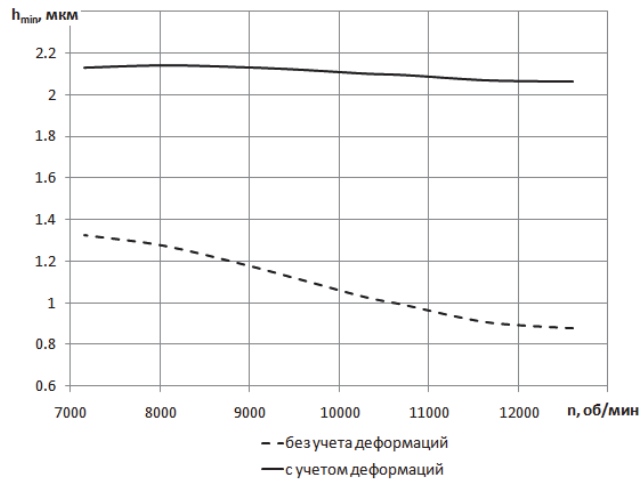
Рассчитанные в зависимости от частоты вращения ротора, характеристики уплотнения представлены на рис. 5 а-г. На рис. 5 д, е представлена эпюра давления в зазоре уплотнения, построен-

ная в зависимости от относительной высоты уплотнения.

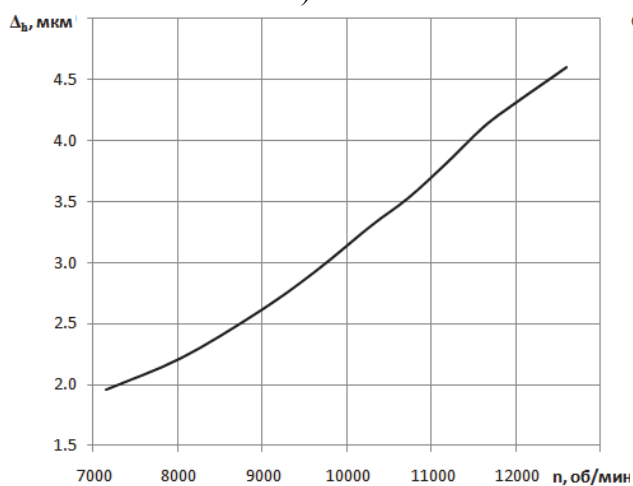
Анализ полученных данных показал, что при расчете характеристик торцевого газодинамического уплотнения, необходимо учитывать деформации графитового кольца [3]. Отклонение зна-



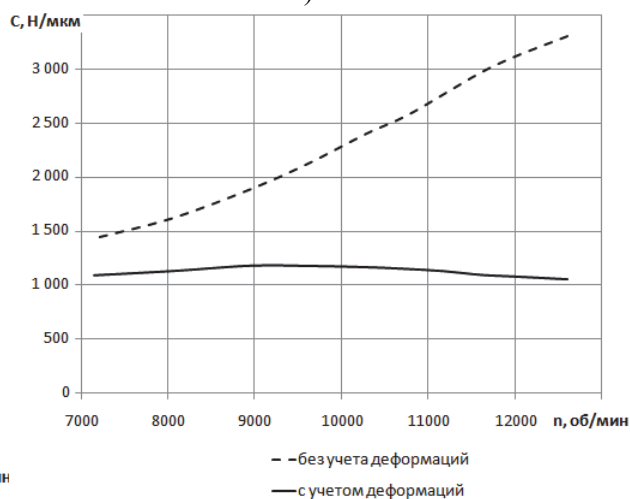
а)



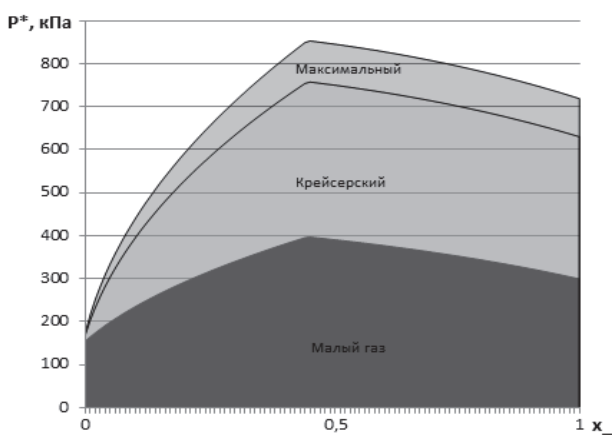
б)



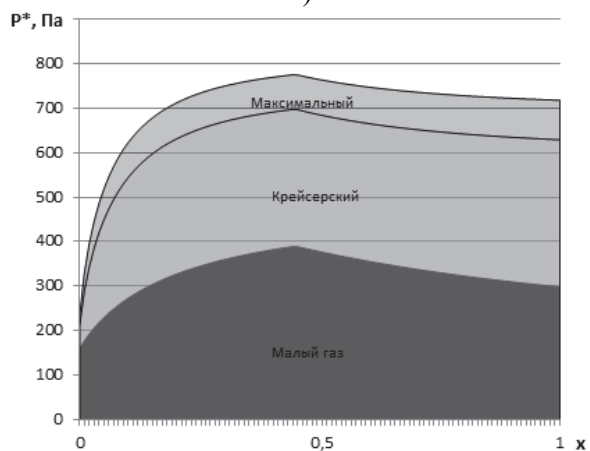
в)



г)



д)



е)

Рис. 5. Зависимость от частоты вращения ротора:

а – величины утечек через зазор; б – величины минимального зазора; в – величины конусности; г – жесткости воздушного слоя между роторным и графитовым кольцом; д – эпюра давления в зазоре без учета деформаций; е – эпюра давлений в зазоре с учетом деформаций

чения рассчитанного без учета деформаций от значения, рассчитанного с учетом деформаций составляет: для величины утечек от 250 до 300%, для величины минимального зазора от 160 до 230%, для жесткости газового слоя в зазоре от 130 до 310%. Данные приведены в диапазоне частот вращения ротора от 7000 до 12000 об/мин.

При учете деформаций существенно меняется эпюра распределения давления в зазоре, что приводит к качественному и количественному изменению характеристик уплотнения.

По проделанной работе можно сделать следующие выводы:

1. При изменении режима от малого газа до максимального величина утечек изменяется на 283%, жесткость меняется на 20%. Таким образом, изменение параметров уплотнения может оказать существенное влияние на работу двигателя при переходах с режима на режим.

2. Учет деформаций качественно и количественно влияет на рассчитанные характеристики торцевого газодинамического уплотнения. Например, значения рассчитанного без учета деформаций от значения, рассчитанного с учетом деформаций составляет: для величины утечек от 250 до 300%, для жесткости газового слоя в зазоре от 130 до 310% при изменении режима от малого газа до максимального. Таким образом, при расчете величины утечек через уплотнение, необходимо учитывать деформации графитового кольца.

3. Существенное изменение жесткости газового слоя (на 210%, без учета деформаций) будет влиять на амплитудно-частотную характеристику уплотнения. Количественно оценить это влияние можно с помощью методики связанного расчета с использованием программных комплексов TORZS, ANSYS, ADAMS. Алгоритм такой методики представлен на рис. 6.

Расчет по разработанному алгоритму сделает возможными исследования нестационарных трехмерных деформаций уплотнительных колец

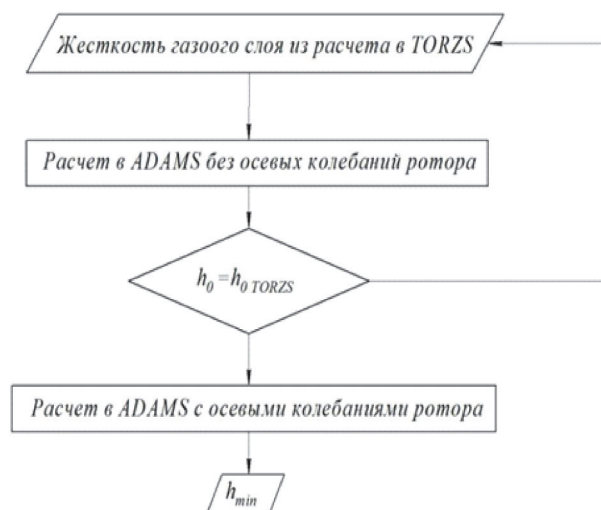


Рис. 6. Алгоритм динамического расчета характеристик уплотнения

и расчет уточненных характеристик уплотнения: жесткости смазочного слоя, изгибающего момента и минимального зазора для всей номенклатуры применяющихся режимов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фалалеев С.В., Чегодаев Д.Е. Торцовые бесконтактные уплотнения двигателей летательных аппаратов. Учебное пособие. М.: Изд-во МАИ, 1998. 276 с.
2. Назаров, А.П. Турбореактивный двухконтурный двигатель с форсажной камерой сгорания АЛ-31Ф [под редакцией А.П. Назарова]. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1987.-363 с.
3. Белоусов А.И., Зрелов В.А. Конструкция и проектирование уплотнений вращающихся валов турбомашин двигателей летательных аппаратов: Учебное пособие. Куйбышев: КуАИ 1989. 104 с.
4. Фалалеев С.В., Седов В.В. Динамические характеристики торцевого газодинамического уплотнения в газоперекачивающем агрегате с магнитным подвесом // Газотурбинные технологии. 2009 № 3. 4 с.
5. Никифоров А.Н. Проблемы колебаний и динамической устойчивости быстровращающихся роторов // Вестник научно-технического развития. 2010. № 3 (31). 20 с.

RESEARCH OF CHARACTERISTICS OF FACE GAS DYNAMIC SEALS SUPPORT AIRCRAFT ENGINE BASED STRAIN OF THE RINGS PAIR OF FRICTION

© 2013 A.S. Vinogradov, E.S. Goryachkin

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

The article discusses the results of calculation of the characteristics of the seal support aircraft engine. Calculation is made with the characteristics of strain O-ring. A comparative analysis of the calculation results with the deformation of the rings and without.

Keywords: deformation seal stiffness leakage gap speed.

Vinogradov Alexander Sergeevich, Candidate of Technics,
Associate Professor. E-mail: a.s.vinogradov@list.ru
Goryachkin Evgeni Sergeevich, Master Student.
E-mail: evgeni0063@yandex.ru