

УДК 621.452.3

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УПЛОТНЕНИЯ ОПОРЫ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ИНЕРЦИОННОСТИ НАГРУЖЕНИЯ

А. С. Виноградов¹, Е. С. Горячкин²

¹a.s.vinogradov@list.ru, ²evgeni0063@yandex.ru

ФГБОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет)» (СГАУ)

Поступила в редакцию 21 марта 2014 г.

Аннотация. Приводится описание методики расчета динамических характеристик торцевого газодинамического уплотнения с учетом инерционности нагружения. Расчет характеристик выполнен с учетом деформаций уплотнительного кольца.

Ключевые слова: динамическая модель; деформации; уплотнение; жесткость утечки; частота вращения; опоры авиационного двигателя.

Одна из наиболее актуальных задач авиационного двигателестроения – повышение эффективности газотурбинных двигателей. Один из возможных способов достижения этого – снижение утечек в уплотнениях опор. Известно несколько видов уплотнений, применяемых в опорах авиационных двигателей. Одним из наиболее эффективных является торцевое газодинамическое уплотнение [1].

В процессе работы двигателя на ротор воздействуют различные факторы (пульсации давления, резонансные колебания и тому подобное), которые могут привести к осевым колебаниям ротора. В этом случае возникает опасность выборки зазора в уплотнении, что может привести к касанию графитового и роторного кольца и их последующему разрушению.

Для анализа влияния на работоспособность уплотнения осевых колебаний ротора, был проведен динамический анализ уплотнительного узла в программном комплексе ADAMS. Алгоритм расчета представлен на рис. 1.

Исходные данные для динамического моделирования уплотнения – геометрия, а также величина жесткости газового слоя в зазоре, рассчитанная с помощью программы TORZS [4].

В программном комплексе ADAMS был проведен расчет величины минимального зазора в уплотнении опоры авиационного двигателя. Расчеты проведены для разных частот и ампли-

туд колебаний ротора. Расчетная модель представлена на рис. 2.

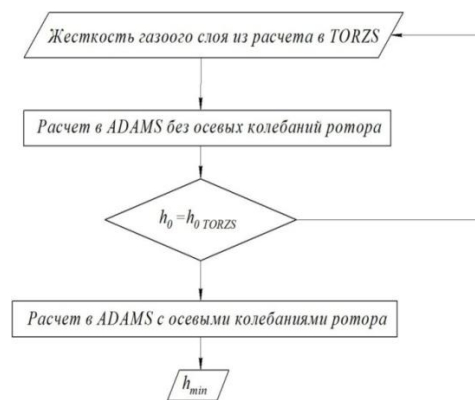


Рис. 1. Алгоритм расчета величины минимального зазора уплотнения в пакете ADAMS

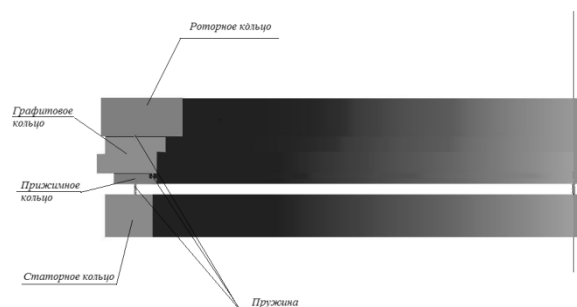


Рис. 2. Расчетная модель торцевого газодинамического уплотнения в пакете ADAMS

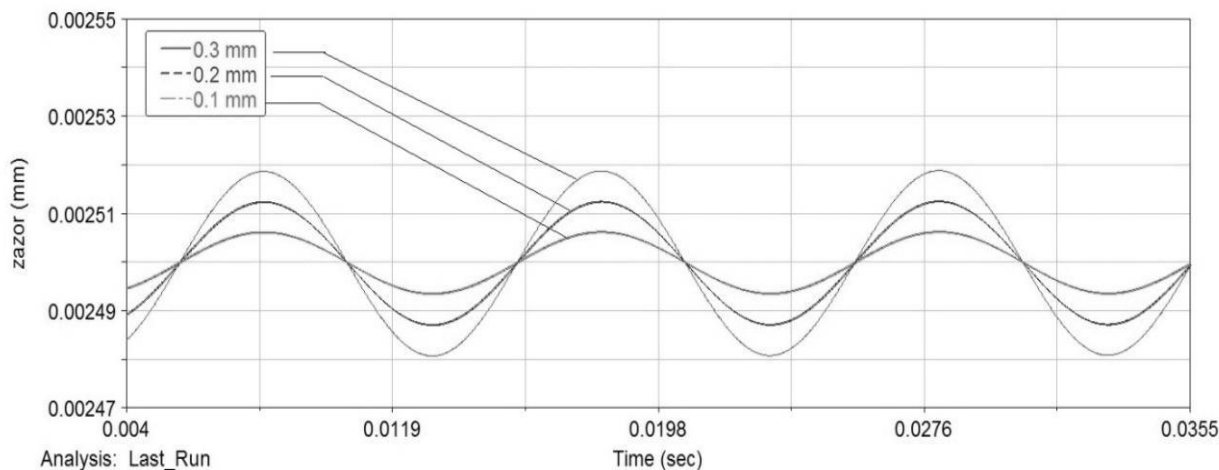


Рис. 3. Изменение величины зазора при линейных колебаниях ротора с частотой 100 Гц при различных амплитудах

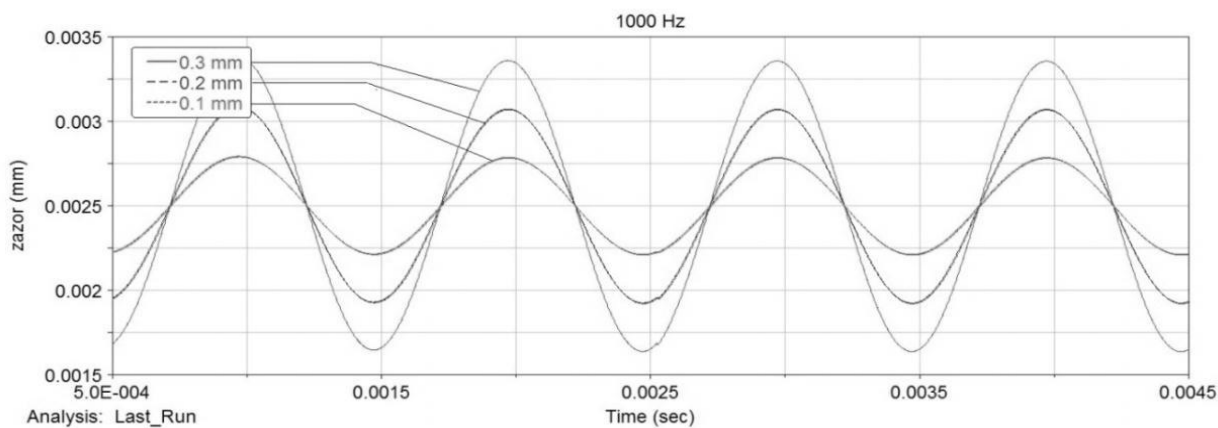


Рис. 4. Изменение величины зазора при линейных колебаниях ротора с частотой 1000 Гц при различных амплитудах

На рис. 3, 4 приведены графики изменения величины минимального зазора при линейных колебаниях ротора.

Минимальная величина зазора при линейных колебаниях с частотой 100 Гц составила: 2.481 мкм, 2.487 мкм, 2.494 мкм при амплитудах колебания ротора 0,3, 0,2, 0,1 мм соответственно.

Минимальная величина зазора при линейных колебаниях с частотой 1000 Гц составила: 1.639 мкм, 1.926 мкм, 2.213 мкм при амплитудах колебания ротора 0,3, 0,2, 0,1 мм соответственно.

Из анализа данных на рис. 3, 4 видно, что амплитуда изменения зазора возрастает при увеличении амплитуды и частоты колебаний ротора.

Был проведен более подробный анализ влияния частоты линейных колебаний ротора на амплитуду изменения зазора в уплотнении (рис. 5).

График, изображенный на рис. 5 позволяет установить область работоспособности уплотнения. В рассмотренном случае уплотнения работоспособно при линейных колебаниях ротора вплоть до частоты 2500 Гц при амплитуде колебаний 0,3 мм.

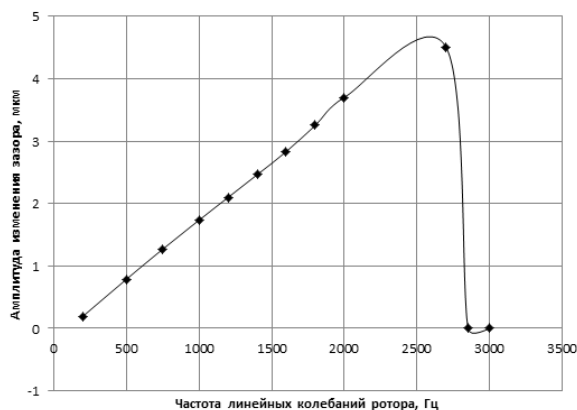


Рис. 5. Амплитуда изменения зазора уплотнения в зависимости от частоты линейных колебаний ротора

В зависимости от размера газовых камер меняется жесткость и коэффициент демпфирования газового слоя в зазоре.

На рис. 6 представлена зависимость амплитуды изменения зазора при различных значениях жесткости газового слоя и постоянном коэффициенте демпфирования.

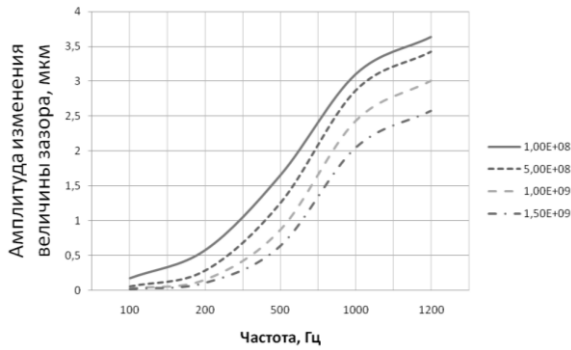


Рис. 6. Зависимость изменения величины зазора от частоты линейных колебаний ротора при различных значениях жесткости газового слоя

Из полученных данных следует, что с увеличением жесткости газового слоя амплитуда изменения зазора в уплотнении уменьшается, что приводит к расширению области частот допустимых линейных колебаний ротора.

На рис. 7 представлена зависимость изменения зазора в уплотнении от частоты линейных колебаний ротора при различных коэффициентах демпфирования воздушного слоя и постоянной жесткости газового слоя.

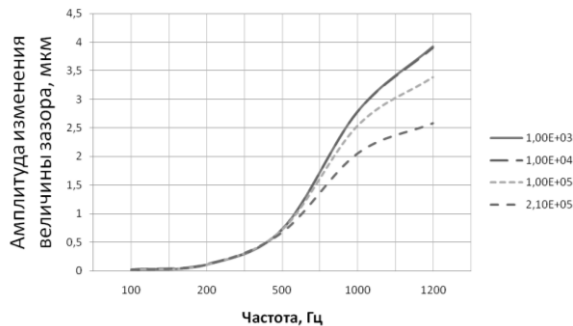


Рис. 7. Зависимость изменения величины зазора от частоты линейных колебаний ротора при различных значениях коэффициента демпфирования газового слоя

Из рис. 7 следует, что с увеличением коэффициента демпфирования амплитуда изменения величины зазора снижается, что приводит к расширению области частот допустимых линейных колебаний ротора.

В процессе работы графитовое кольцо деформируется, причем в зависимости от частоты

вращения ротора характер деформаций различается [4].

Для расчета деформированного состояния кольца при различных частотах вращения ротора была составлена методика, алгоритм которой приведен на рис. 8.

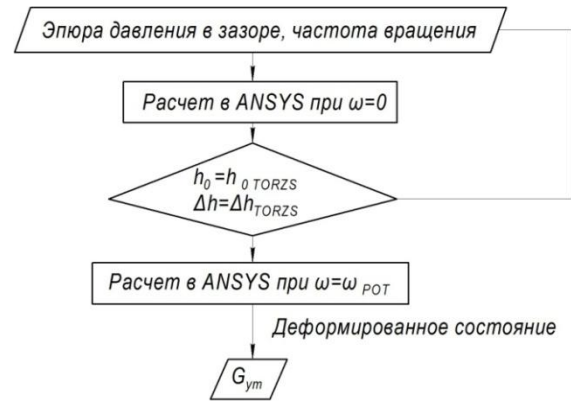


Рис. 8. Алгоритм расчета уплотнения с учетом инерционности нагружения

По результатам газодинамического расчета получено распределение давлений по сектору графитового кольца (рис. 9).

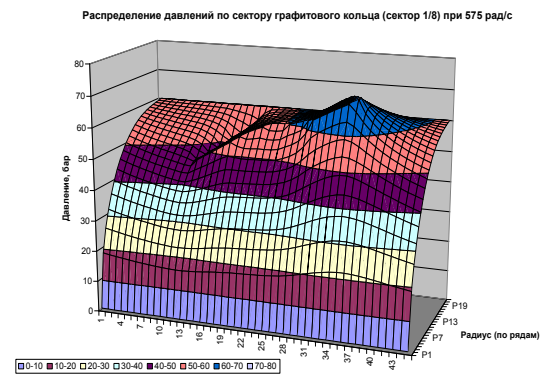


Рис. 9. Распределение давлений по сектору графитового кольца при частоте вращения ротора 575 рад/с

Полученное распределение давлений было передано в программный комплекс ANSYS для последующего расчета деформированного состояния кольца. Представленные на рис. 10 графики линейаризованы и не отражают изгиб сектора, но при этом важно отметить, что при увеличении оборотов происходит искривление распределения давлений и, следовательно, на кольцо при разных оборотах действует различное давление.

Из полученных данных следует, что с увеличением угловой скорости вращения нагрузки происходит увеличение прогиба кольца под действием двух факторов – увеличение угловой

скорости снижает амплитуду колебания диска под действием нагрузки, но при этом увеличивает прогиб из-за уменьшения времени, которое требуется кольцу для ответного инерционного смещения. Второй фактор – это увеличение суммарного давления, действующего на рабочую поверхность кольца. Действие этих двух факторов влекут за собой при этом различное изменение графика перемещений.

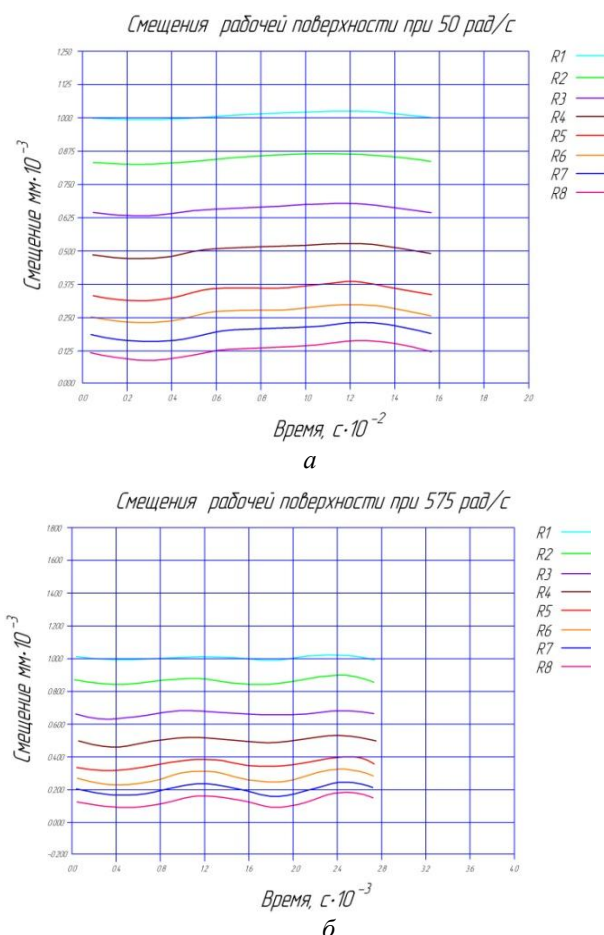


Рис. 10. Деформированное состояние кольца при частоте вращения ротора 50 рад/с (а) и 575 рад/с (б)

По проделанной работе можно сделать следующие выводы:

1. Увеличение частоты вращения приводит к значительным изменениям уплотнительного зазора от $\pm 10\%$ при 100 Гц, до $\pm 100\%$ при 1000 Гц.

2. С увеличением жесткости величина зазора уменьшается. Влияние жесткости начинает заметно сказываться на частотах свыше 200 Гц. Это особенно важно для обеспечения гарантированного зазора в уплотнении. Также было показано, что для рассматриваемого уплотнения демпфирование начинает влиять на частотах больше 500 Гц.

3. Деформации уплотнительного кольца зависят от частоты вращения ротора. Данное обстоятельство необходимо учитывать для более точного расчета величины утечек через уплотнение.

Выполнение работ по созданной методике делает возможным выполнение расчетов характеристик торцевого газодинамического уплотнения на переходных режимах с учетом инерционности нагружения, оценку влияния характеристик уплотнения на КПД двигателя и удельные параметры, а также создание его анимационной математической модели, дальнейшее развитие проектирования торцевого уплотнения с совместным расчетом деформаций деталей уплотнения и его амплитудно-частотных характеристик, реализованных в рамках единого алгоритма. Это сделает возможным исследование нестационарных трехмерных деформаций уплотнительных колец 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: учеб. пособие. М.: Изд-во МАИ, 1998. 276 с. [S. V. Falaleev and D. E. Chegodaev, *Face non-contact seals for aircraft engines*, (in Russian). Moscow: Moscow Aviation Institute, 1998.]
2. **Белоусов А. И., Зрелов В. А.** Конструкция и проектирование уплотнений вращающихся валов турбомашин двигателей летательных аппаратов: учеб. пособие. Куйбышев: КуАИ, 1989. 104 с. [A. I. Belousov and V. A. Zrelov, *Construction and design of turbomachine rotating shaft seals for aircraft engines*, (in Russian). Kuibyshev (f. USSR): Kuibyshev Aviation Institute, 1989.]
3. **Фалалеев С. В., Седов В. В.** Динамические характеристики торцевого газодинамического уплотнения в газоперекачивающем агрегате с магнитным подвесом // Газотурбинные технологии. 2009. № 3. С. 31–53 [S. V. Falaleev and V. V. Sedov, "Dynamic characteristics of face gas dynamical seal in gas pump unit with magnetic bearings," (in Russian), *Gazoturbinnie tehnologii*, no. 3, pp. 34-37, 2009.]
4. **Никифоров А. Н.** Проблемы колебаний и динамической устойчивости быстровращающихся роторов // Вестник научно-технического развития. 2010. № 3 (31). С. 31–53. [A. N. Nikiforov, "Problems of oscillations and dynamical stability high rotation rotors," (in Russian), *Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya*, no. 3, pp. 31-53, 2010.]

ОБ АВТОРАХ

ВИНОГРАДОВ Александр Сергеевич, доц. каф. конструкции и проектирования двигателей ЛА. Дипл. инж.-мех. (СГАУ, 1996). Канд. техн. наук (СГАУ, 2002), доцент. Иссл. в обл. уплотнений опор двигателей летательных аппаратов, конструкций двигателей летательных аппаратов.

ГОРЯЧКИН Евгений Сергеевич, магистрант факультета двигателей летательных аппаратов. Иссл. в обл. конструкций двигателей летательных аппаратов.

METADATA

Title: Creation of an account methodic for dynamic characteristics of seal in an aviation engine support taking into account inertia loading.

Authors: A. S. Vinogradov¹, E. S. Goryachkin²

Affiliation:

Samara State Aerospace University (SSAU), Russia.

Email: ¹a.s.vinogradov@list.ru, ²evgeni0063@yandex.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 4 (65), pp. 79-83, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: In article the description of methodic for dynamic characteristics account of face gas dynamical seal taking into account an inertia loading is made. Calculation of characteristics is executed taking into account seal ring deformations.

Key words: dynamical model; deformations; seal; stiffness; leakage; frequency of rotation; aviation engine support.

About authors:

VINOGRADOV, Alexandr Sergeevich, Doz., Dep. of Aircraft Engines. Dipl. Engineer (SSAU, 1996). Cand. of Tech. Sci. (SSAU, 2002).

GORYACHKIN, Evgeny Sergeevich, Master of Aircraft Engine (SSAU, 2014).