

УДК 621.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ КОРПУСОВ И РОТОРОВ МНОГОВАЛЬНЫХ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПРОТИВОВРАЩЕНИЕМ РОТОРОВ ПРИ ЭВОЛЮЦИЯХ САМОЛЕТА

Б. С. Блинник¹, А. Д. Бортников², Е. М. Гуго³, В. В. Стародубцев⁴

¹bbs@ciam.ru, ²adb@ciam.ru, ³titan@ciam.ru, ⁴starodubtsev@ciam.ru

¹⁻⁴ ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова»
(ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова»)

Поступила в редакцию 1 июля 2015 г.

Аннотация. Применительно к задаче назначения радиальных зазоров в проточной части авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) рассмотрен вопрос об определении перемещений корпусов и роторов от нагрузок, возникающих при эволюциях летательного аппарата (ЛА). Упругие перемещения корпусов и роторов, вызываемые инерционными и эволюционными перегрузками сопоставимы со значениями эксплуатационных радиальных зазоров и должны учитываться. При определении перемещений, от гироскопических моментов, возникающих при эволюциях, необходимо принимать во внимание противовращение роторов низкого и высокого давления (РНД и РВД). Влияние нагрузок, возникающих при эволюциях ЛА, на радиальные перемещения ротора и корпуса газогенератора рассмотрено на примере двухконтурного двигателя с противовращением роторов. При определении перемещений роторов рассмотрено взаимное влияние упругих деформаций в опорах силовых корпусов.

Ключевые слова: радиальный зазор; перегрузка; эволюции; податливость; перемещение; 3D конечно-элементные модели.

Составляющие радиальных зазоров обуславливаются сборкой и перемещениями деталей статора и роторов, вызванными воздействием нагрева, центробежных сил, внутреннего давления, инерционных нагрузок и эволюционных перегрузок. Радиальные зазоры в проточной части двигателя на эксплуатационных режимах составляют десятые доли миллиметра, в связи с этим ни одним из перечисленных выше факторов пренебрегать нельзя.

Множество работ посвящено изучению влияния на радиальный зазор неравномерного нагрева деталей двигателя, перемещений лопаток и дисков под действием центробежных сил, включая учет деформаций пластичности и ползучести, действия сил давления [1–4]. При этом число исследований взаимных перемещений роторов и корпусов двигателей, вызываемых

инерционным нагружением и эволюционными перегрузками, незначительно. Здесь следует отметить работы Н. И. Котерова с сотрудниками [5], посвященные данной проблеме.

При выборе расчетных режимов в первую очередь необходимо обращать внимание на условия полета, как с наибольшими значениями отдельных видов нагрузок, так и с их комбинациями. Например, целесообразно рассмотреть условия посадки летательного аппарата (ЛА) и условия полета со значительными эволюционными и инерционными перегрузками (выход из штопора, различного рода развороты). Типичные схемы корпуса и ротора авиационного газотурбинного двигателя (АГТД) представлены на (рис. 1, 2).

Предполагалось, что крепление двигателя осуществляется в двух поясах (рис. 1, 2).

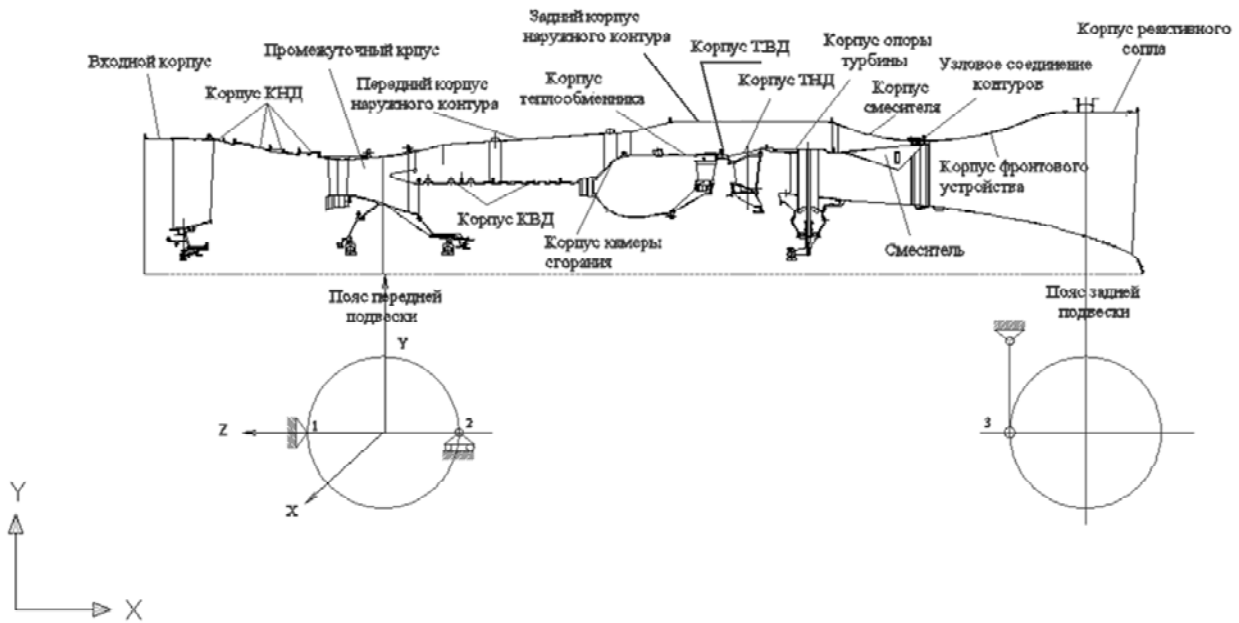


Рис. 1. Типичная система корпус – подвеска

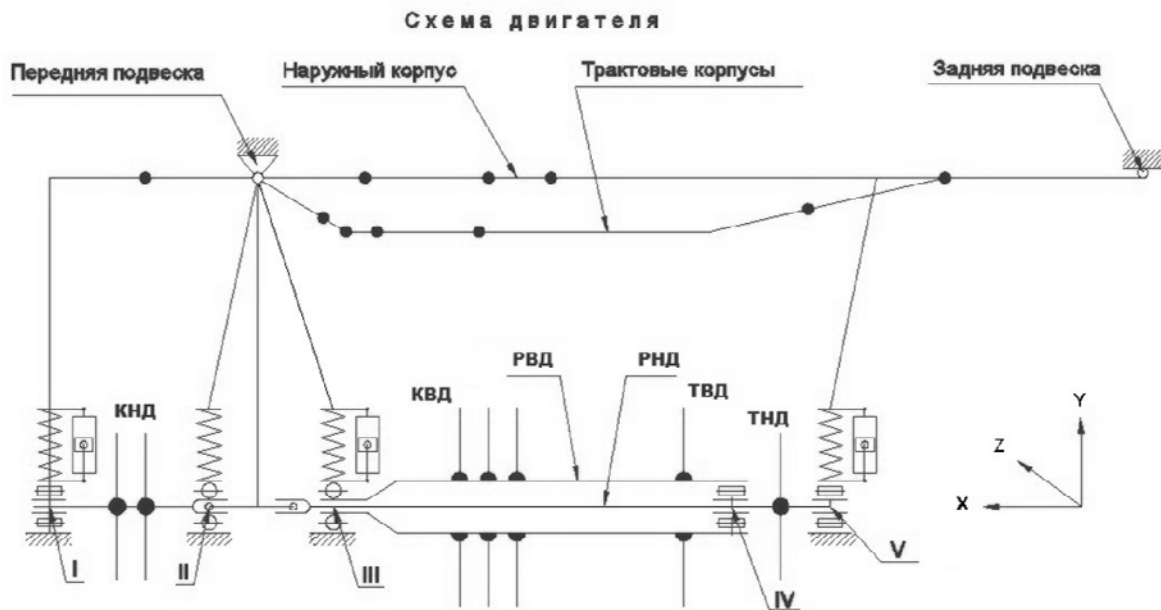


Рис. 2. Типичная схема ротора двигателя

Влияние нагрузок, возникающих при эволюциях, на радиальные перемещения ротора и корпуса газогенератора проведено на примере двухконтурного двигателя с противовращением роторов и скольжением между ними близким к 0,8. Податливость узлов крепления двигателя не рассматривалась. Все опоры двигателя содержали упругие элементы. На рис. 2 цифрами I–V указаны сечения, соответствующие расположению опор двигателя.

Для учета всех видов перемещений (включая овализацию корпусов) роторы и корпуса двигателя моделировались с помощью 3D ко-

нечных элементов. Конечно-элементная модель корпусной системы двигателя каскада ВД содержала 7 млн элементов первого порядка точности и 1,17 млн узлов, а модель ротора – 200,9 тыс. элементов второго порядка точности и 1,09 млн узлов (рис. 3, 4). Расчеты проводились в упругой постановке с использованием программного комплекса ANSYS.

Задняя подвеска моделировалась накладкой (рис. 1, 4). Несколько узлов в конечных элементах накладки ограничены перемещениями в вертикальном и боковом направлениях.

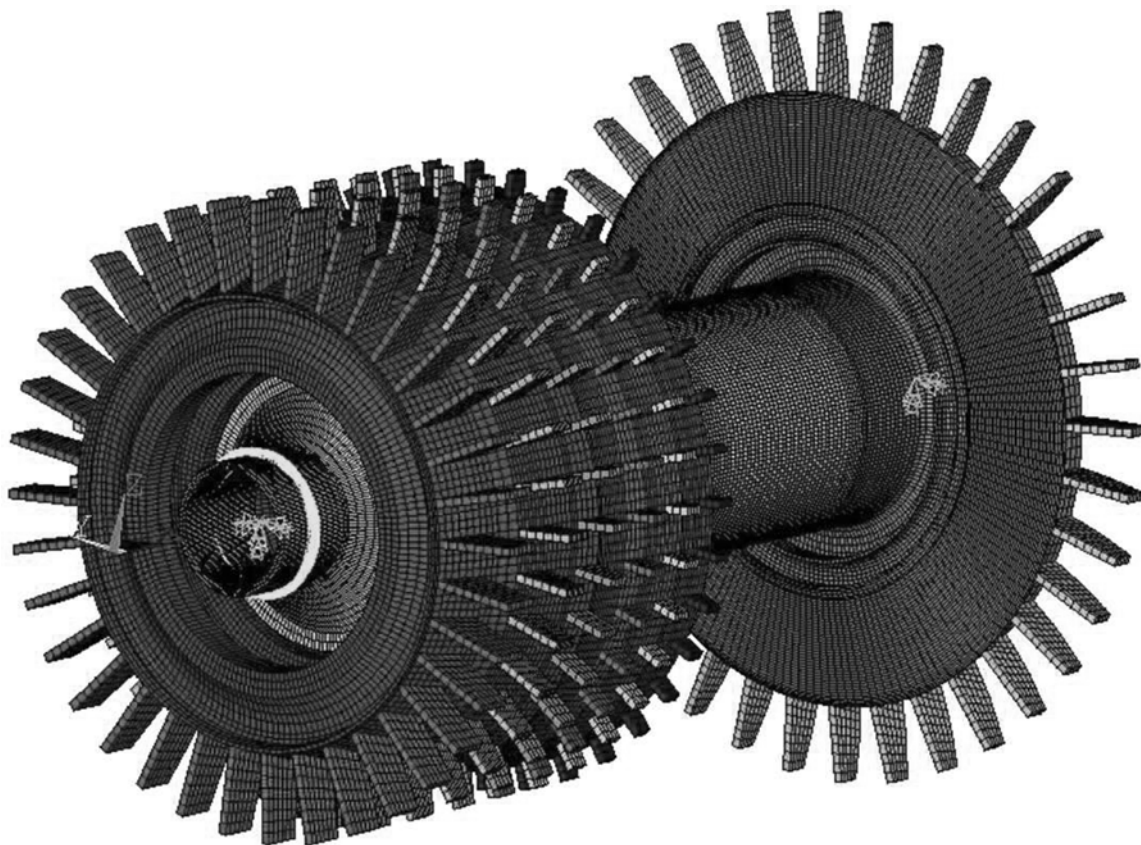


Рис. 3. Конечно-элементная модель ротора ВД

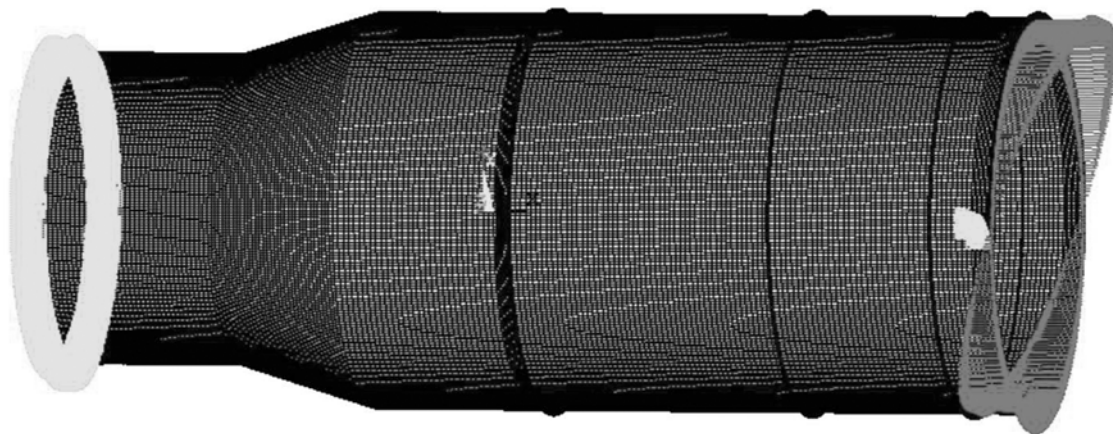


Рис. 4. Конечно-элементная модель, граничные условия (в т. ч. условия закрепления), изгибающий момент и перерезывающая силы от недостающей задней части сопла

ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РОТОРА

Перемещения роторов обусловлены деформациями собственно роторов и их перемещениями как твердого тела вследствие деформаций опор и упругих элементов. Перегрузки и эволюции ЛА незначительно влияют на деформации оси роторов и составляют сотые доли миллиметра (рис. 5). Это обстоятельство указывает на возможность использования одномер-

ных моделей при определении упругих прогибов роторов. Исключения могут составлять роторы с консольными дисками, несущими податливые лопатки.

Перемещения РНД и РВД как твердых тел в опорах корпусов взаимосвязаны и их нельзя рассматривать независимо друг от друга. Взаимосвязанность перемещений РНД и РВД учитывается посредством перекрестных податливостей опор. Для учета взаимосвязанности пере-

мещений роторов к расточкам опор промежуточного корпуса и опоры турбины низкого давления (ТНД) прикладываются распределенные по закону косинуса единичные нагрузки, а затем вычисляются соответствующие перемещения. Таким образом, для определения перемещений в опорах одного из роторов двухконтурного двигателя от нагрузок, возникающих при эволюциях ЛА, необходимо располагать 3D-моделями и инерционно массовыми характеристиками РНД и РВД.

При моделировании опор с соответствующими податливостями применялся двумерный элемент COMBIN214. Один конец этого элемента жестко связывался с моделью ротора, а второй имел следующие граничные условия: в опоре компрессор высокого давления (КВД) – запрет перемещений по всем степеням свободы, в опоре турбины высокого давления (ТВД) допускалось осевое смещение ротора. Значения принятых податливостей опор помещены в таблицу.

Таблица

| Прямые податливости опор | | |
|----------------------------------|--|--|
| Номера опор и типы податливостей | Прямые податливости опор $\delta_{ij} \cdot 10^6$ [см/кгс] | Податливость упругого элемента, $\delta_p \cdot 10^6$ [см/кгс] |
| №1 КНД 1, δ_{11} | 24.3 | 20 |
| №2 КНД 2, δ_{22} | 44.5 | 20 |
| №3 КВД, δ_{33} | 24.2 | 20 |
| №4 ТВД, δ_{44} | 22.5 | 20 |
| №5 ТНД, δ_{55} | 23.5 | 20 |

Перекрестная податливость между передней опорой КНД и опорой КВД принята соответ-

ствующей $\delta_{12} = 0.5 \cdot \delta_{33}$, а перекрестная податливость между задней опорой КНД и опорой КВД – $\delta_{23} = 0.5 \cdot \delta_{33}$. Перекрестная податливость опор ТВД и ТНД из-за близости их расположения принималась $\delta_{45} = \delta_{44}$.

Как показали расчеты, максимальные смещения РВД происходят вблизи опор на режимах с наибольшими эволюциями (штопор, выход из пикирования, развороты) (рис. 5). Указанные смещения роторов обусловлены податливостью опор и воздействием гироскопических моментов. Таким образом, противовращение может заметно уменьшить изменение радиального зазора на режимах максимальных эволюционных перегрузок особенно применительно к рабочим лопаткам первых ступеней КВД и рабочим лопаткам турбин. Направления реакций в опорах от весовых и эволюционных перегрузок может совпадать или быть перпендикулярным, что следует учитывать при определении перемещений роторов в опорах, складывая эти реакции геометрически.

Наибольшие радиальные перемещения, обусловленные гироскопическими моментами, возникают вблизи опор, в частности ТВД. Поэтому влияние на перемещения роторов в других опорах будет менее значительно. Роликовый подшипник КНД расположен в отдельной опоре, в связи с этим влияние противовращения на перемещения здесь минимально. Противовращение роторов оказывает наибольшее влияние на радиальные перемещения рабочих колес турбин ВД и НД. Особенно сказывается близость осевого расположения подшипников этих узлов (например, межроторный подшипник), чему соответствует соотношение перекрестной и прямой податливостей опор турбин $\delta_{45} = \delta_{44}$.

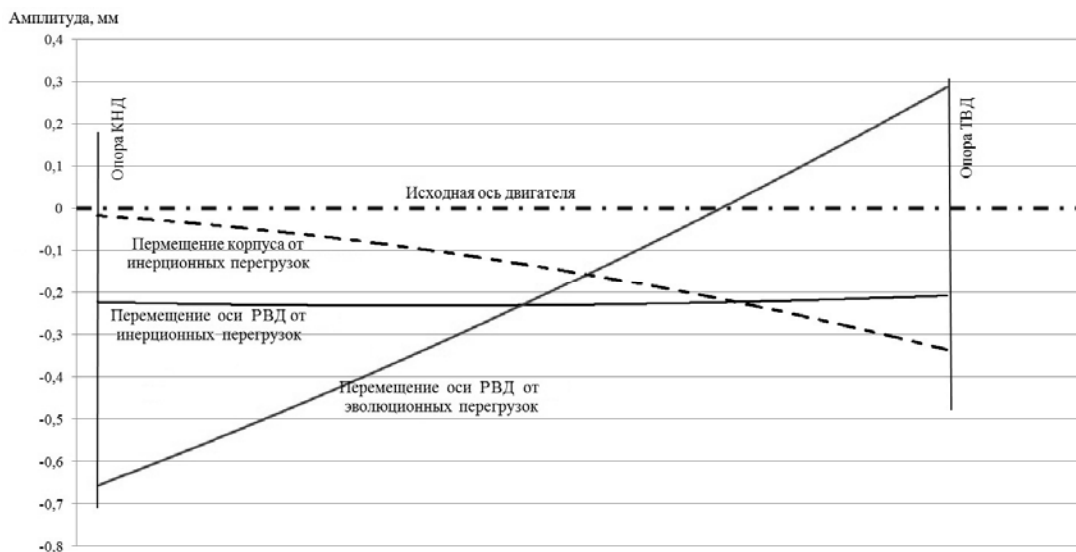


Рис. 5. Перемещение ротора ВД под действием инерционных и эволюционных перегрузок

В рассмотренном примере, при эволюционных перегрузках противоразношение уменьшило радиальные перемещения колеса ТВД с 0,67 мм до 0,29 мм (рис. 5).

Анализ проведенных расчетов величины перемещений вследствие эволюционных перегрузок показывает их значительность, как указывалось в начале статьи. Таким образом, при назначении радиальных зазоров необходимо знать: радиальные перемещения ротора и статора в процессе типового полетного цикла (ТПЦ) от теплового нагружения и центробежных сил; величины перемещений элементов двигателя при эволюциях; моменты времени, в которых возможны эволюционные перегрузки.

ПЕРЕМЕЩЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ КОРПУСОВ

Корпус рассмотренного КВД имел горизонтальный фланец рис. 6. Для обеспечения стабильности радиального зазора на переходных режимах корпус выполнен двустенным (рис. 6). Перемещения двустенного корпуса газогенератора при изгибе под действием эволюционных и весовых перегрузок представлены на рис. 7. Изменение цилиндрической формы корпусов в сторону их овализации в процессе эволюционных перегрузок мало (рис. 6–8). Отметим, что при других видах нагружения корпусов их овализация может быть более значительной.

Для учета влияния перемещений ротора и корпуса при инерционных и эволюционных перегрузках необходимо знать, на каком этапе полетного цикла возможно возникновение режимов с инерционными и эволюционными перегрузками.

Несимметричная деформация корпусов в районе задней подвески не сказывается на радиальных перемещениях корпусов газогенератора (рис. 9).

Сопоставление величин радиальных перемещений ротора и статора ВД, полученных в рассмотренном примере, указывает на необходимость учета влияния эволюционных перегрузок при расчете радиальных зазоров.

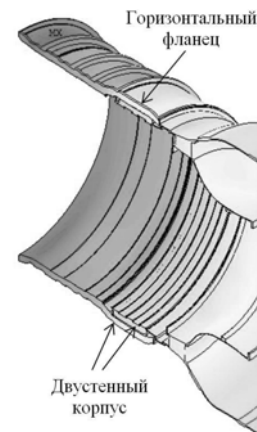


Рис. 6. Двустенный корпус КВД с горизонтальным фланцем

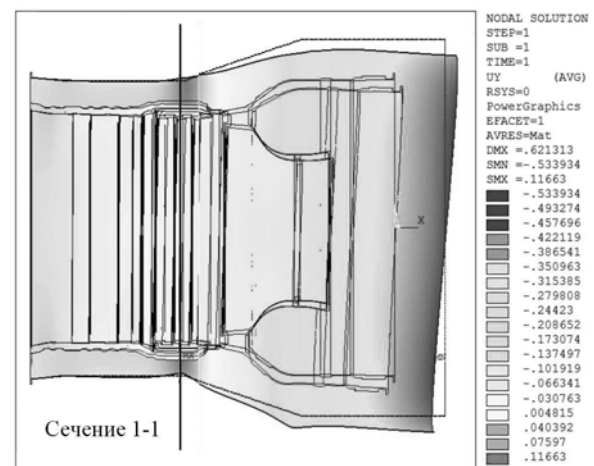


Рис. 7. Вертикальные перемещения корпусов КВД, камеры сгорания и ТВД [мм]

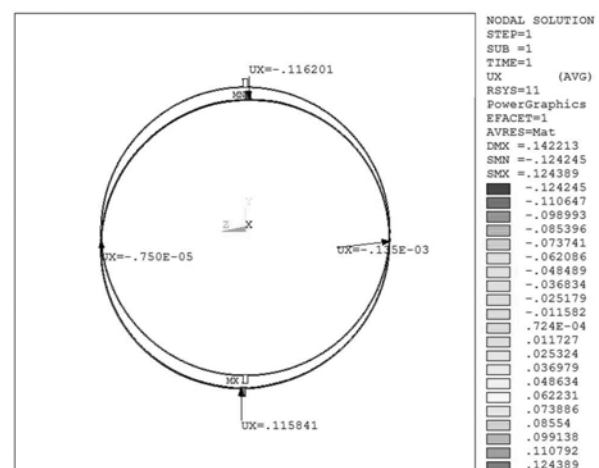


Рис. 8. Радиальные перемещения корпуса в сечении 1-1



Рис. 9. Несимметричная деформация корпусов в районе задней подвески

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные расчетные исследования показали:

- величины радиальных перемещений роторов, обусловленные эволюционными перегрузками, сопоставимы с эксплуатационными радиальными зазорами и должны быть учтены;
- противовращение роторов оказывает наибольшее влияние на радиальные перемещения РВД, при этом значительную роль играют гироскопические моменты и перекрестные податливости опор;
- противовращение может служить эффективным средством по уменьшению радиальных перемещений, особенно применительно к роторам ВД АГТД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lattime S. B., Steinetz B. M. High-Pressure-Turbine clearance control systems: Current practices and future directions. *Journal of Propulsion and Power*. – v. 20. – no. 2, March-April, 2004. [S. B. Lattime and B. M. Steinetz, "High-Pressure-Turbine clearance control systems: Current practices and future directions", in *Journal of Propulsion and Power*, v. 20, no. 2, 2004.]
2. Иноземцев А. А. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: учебник / А. А. Иноземцев, М. А. Нихамкин, В. Л. Сандрацкий. - М.: Машиностроение. – Т. 4: Динамика и прочность авиационных двигателей и энергетических установок. – 2008. – с. 494-499. [А. А. Inozemtsev, *Fundamentals of design aircraft engines and power facilities: tutorial*. (In Russian) / А. А. Inozemtsev, М. А. Nihamkin, V. L. Sandrackii. Moscow: Engineering, vol. 4 Dynamics and strength of aircraft engines and power facilities, 2008, pp. 494-499.]
3. Зеленский Р. Л., Сиренко Ф. Ф., Кулик Т. В. Исследование влияния режимов работы двигателя и формы диска на динамические характеристики его радиальных перемещений // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2011. № 7 (84). С. 180–185. [R. L. Zelenskii,

F. F. Sirenko and T. V. Kulik, "Research of the effect of engine and disc-shape on the dynamic characteristics of its radial displacement," (In Russian), in *Aviacionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya*, no. 7 (84), pp. 180-185, 2011.]

4. **Машиностроение**. Энциклопедия в 40 т. Т. IV-21. Самолеты и вертолеты. Кн. 3. Авиационные двигатели / В. А. Скибин, В. И. Солонин, Ю. М. Темис и др.; под ред. В. А. Скибина, Ю. М. Темиса и В. А. Соснуова. М.: Машиностроение, 2010. – 720 с. Engineering: In 40 volumes. Section 4. Raschet i konstruirovaniemashin [Calculation and construction of machines].v. 4-21. Aircraft and helicopters. vol. 3. "Aviation engines: Encyclopedia", (In Russian) / V. A. Skibin, Yu. M. Temis, V. A. Sosunov. Moscow: Engineering, 720 p., 2010]

5. **Котеров Н. И., Даревский В. М. и др.** Методы расчета на прочность корпусов, оболочек, направляющих и сопловых аппаратов газотурбинного двигателя // *Труды ЦИАМ*. 1977. №769. Москва. С. 154–160. [N. I. Koterov and V. M. Darevskiy, *Methods for calculating the strength of cases, shells, guides and nozzle vanes of the gas turbine engine*, (In Russian). *Works of CIAM*, no. 769, pp. 154-160, 1977.]

6. **Скубачевский Г. С.** Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей. – М.: Машиностроение. 1969. 544 с. [G. S. Skubachevskiy, *Aircraft gas turbine engines. The design and calculation of components*, (In Russian). Moscow: Engineering, 1969, pp. 544.]

7. **Вьюнов С. А., Гусев Ю. И., Карпов А. В.** Конструкция и проектирования авиационных газотурбинных двигателей / Под общ. ред. Д. В. Хронина. – М.: Машиностроение. – 1989. – 368 с. [S. A. Vyunov, U. I. Gusev and A. V. Karpov, *The construction and design of aircraft gas turbine engines*, (In Russian). Moscow: Engineering, 1989.]

ОБ АВТОРАХ

БЛИННИК Борис Соломонович, канд. техн. наук, начальник отдела, ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова». Область научных интересов: динамика и прочность авиационных двигателей.

БОРТНИКОВ Андрей Дмитриевич, аспирант, инженер отделения 200, ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова». Область научных интересов: динамика и прочность авиационных двигателей.

ГУГО Евгений Максимович, ведущий конструктор отделения 200, ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова». Область научных интересов: динамика и прочность авиационных двигателей.

СТАРДУБЦЕВ Владимир Викторович, аспирант, ведущий инженер отделения 200, ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова». Область научных интересов: динамика и прочность авиационных двигателей.

METADATA

Title: Determination of radial displacements of cases and aviation multi-shaft counter-rotors engines during the aircraft evolution.

Authors: B. S. Blinnik¹, A. D. Bortnikov², E. M. Gugo³, V. V. Starodubtsev⁴

Affiliation:

Central Institute of Aviation Motors, Russia.

Email: ¹bbs@ciam.ru, ²adb@ciam.ru, ³titan@ciam.ru, ⁴starodubtsev@ciam.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 19, no. 3 (69), pp. 70-76, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: As applied to the problem of radial clearances appointment in flow part of aviation gas turbine engines, the question on definition of displacements of cases and rotors from loads occurring during the aircraft evolutions is considered. Elastic displacements of cases and rotors caused by weight and evolution overloads are comparable with the values of the operating radial clearance and must be considered. When determining the displacements from gyroscopic moments that occur during the evolution, it is necessary to take into account the high and low pressure rotors counter-rotation. On the example of bypass engine with rotors counter-rotation, the influence of loads, which occurring during the evolutions, on the radial displacements of rotors and the cases in producer is shown. When determining the displacements of rotors the mutual influence of elastic deformations in power case supports is taken into account.

Key words: radial clearance; overload; evolutions; flexibility; displacement; 3-D finite element models.

About authors:

BLINNIK, Boris Solomonovich, Candidate of Technical Sciences, Chief of Department, Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation. Area of research: dynamics and strength of aviation engines.

BORTNIKOV, Andrey Dmitrievich, Postgrad. (PhD) Student, Engineer of Department, Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation. Area of research: dynamics and strength of aviation engines.

GUGO, Evgeniy Maksimovich, Project Engineer of Department, Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation. Area of research: dynamics and strength of aviation engines.

STARODUBTSEV, Vladimir Viktorovich, Postgrad. (PhD) Student, Principal Engineer of Department, Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation. Area of research: dynamics and strength of aviation engines.