

УДК 534.17

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ТУРБОНАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ В СОСТАВЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКИХ ВИБРАЦИОННЫХ НАГРУЗОК

И. А. Кривошеев¹, А. Ф. Ивашин², Е. В. Осипов³, А. В. Чебаков⁴

¹krivosh777@mail.ru, ³evgeny.osipov@mail.ru

¹ ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

^{2,3} Филиал АО «ВПК «НПО машиностроения» - Конструкторское бюро «Орион»

⁴ АО «ВПК «НПО машиностроения»

Поступила в редакцию 02.11.2018

Аннотация. В работе рассмотрены проблемы обеспечения герметичности турбонасосного агрегата (ТНА) и турбонасосного гидроагрегата (ТНГА) законсервированной топливной системы (ТС) динамически высоконагруженного двигателя летательного аппарата (ЛА). Целью выполненной работы является исследование влияния различных факторов на герметичность ТНА, ТНГА при воздействии вибраций и разработка критериев обеспечения герметичности. Учитывая влияние на герметичность агрегатов множества факторов, которые не представляется возможным учесть в расчетах, в работе применены экспериментальные методы исследований. По экспериментальным точкам построена критериальная зависимость утечек топлива от радиального люфта ротора и выделена зона перехода агрегатов из герметичного состояния в негерметичное. Проектирование и изготовление ТНА, ТНГА с применением разработанных критериев обеспечило надежную герметичность агрегатов при воздействии вибраций и повысило надежность изделий с их применением.

Ключевые слова: герметичность; манжета армированная; турбонасосный агрегат; вибрационная нагрузка; радиальный люфт ротора; измерение; надежность

ВВЕДЕНИЕ

При совместном полете ЛА с самолетом-носителем остро стоит проблема обеспечения герметичности ТНА, ТНГА и законсервированной ТС динамически высоконагруженного двигателя ЛА [1]. Утечки топлива из законсервированной ТС двигателя ЛА недопустимы в течении всего срока эксплуатации изделия, включая транспортирование, хранение и совместный полет с самолетом-носителем. Последствия утечек топлива могут быть весьма серьезными. Наличие топлива в агрегатном отсеке может привести к разрушению нестойких к топливу элементов при длительном хранении. Возможна нештатная работа агрегатов в процессе запуска, нештатный запуск двигателя ЛА. Потери топлива в ТС приведут к нару-

шению компенсации температурных расширений, в результате могут разрушиться уплотнительные армированные манжеты агрегатов и ТС полностью расконсервируется. Попадание керосина в агрегатный отсек может привести к возгоранию на работающем двигателе ЛА и потере изделия.

Целью выполненной работы является исследование влияния различных факторов на герметичность ТНА, ТНГА двигателя ЛА при воздействии вибраций и разработка способов обеспечения герметичности. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: проанализированы проблемы обеспечения герметичности законсервированной ТС вибрационно высоконагруженного двигателя ЛА; исследованы факторы, влияющие на герметичность ТНА,

ТНГА в динамических условиях; определены причины утечек топлива из агрегатов и разработаны способы обеспечения герметичности в динамических условиях; эффективность предложенных решений подтверждена натурными испытаниями.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

При воздействии на жидкостный ракетный двигатель (ЖРД) или прямоточный воздушно-реактивный двигатель (ПВРД) больших вибрационных нагрузок [2–4] во время совместного полета ЛА с самолетом-носителем остро стоит проблема обеспечения герметичности ТНА, ТНГА и законсервированной ТС.

Для выполнения исследований был создан экспериментальный стенд. Схема проведения виброиспытаний двигателя ЛА показана на рис. 1. Вибрационные испытания проводятся на вибростенде с приложением вибрационных нагрузок в направлении осей OX , OY , OZ .

Двигатель ЛА устанавливается на вибростенд посредством технологической

оснастки. При испытаниях по оси OX двигатель ЛА устанавливается непосредственно на подставку вибрационной установки, при испытаниях по осям OY , OZ – на вибростол. Режимы испытаний задаются по контрольным датчикам, закрепленным в районе фланца стыковки ЛА с двигателем.

Объекты исследований представляют собой ТНА и ТНГА. Данные агрегаты близкие по конструкции. На рис. 2 показан продольный разрез ТНА и место утечки топлива. Топливо вытекает из законсервированной ТС через армированные манжеты [5, 6], установленные в узле уплотнения. Протечки происходят из-под уплотняющих кромок манжет по валу ротора.

В конструкцию узла уплотнения (рис. 3) входят две армированные манжеты с браслетными пружинами, разделенные между собой кольцом. Манжеты установлены в корпус уплотнения и зафиксированы от осевого перемещения кольцом ограничительным.

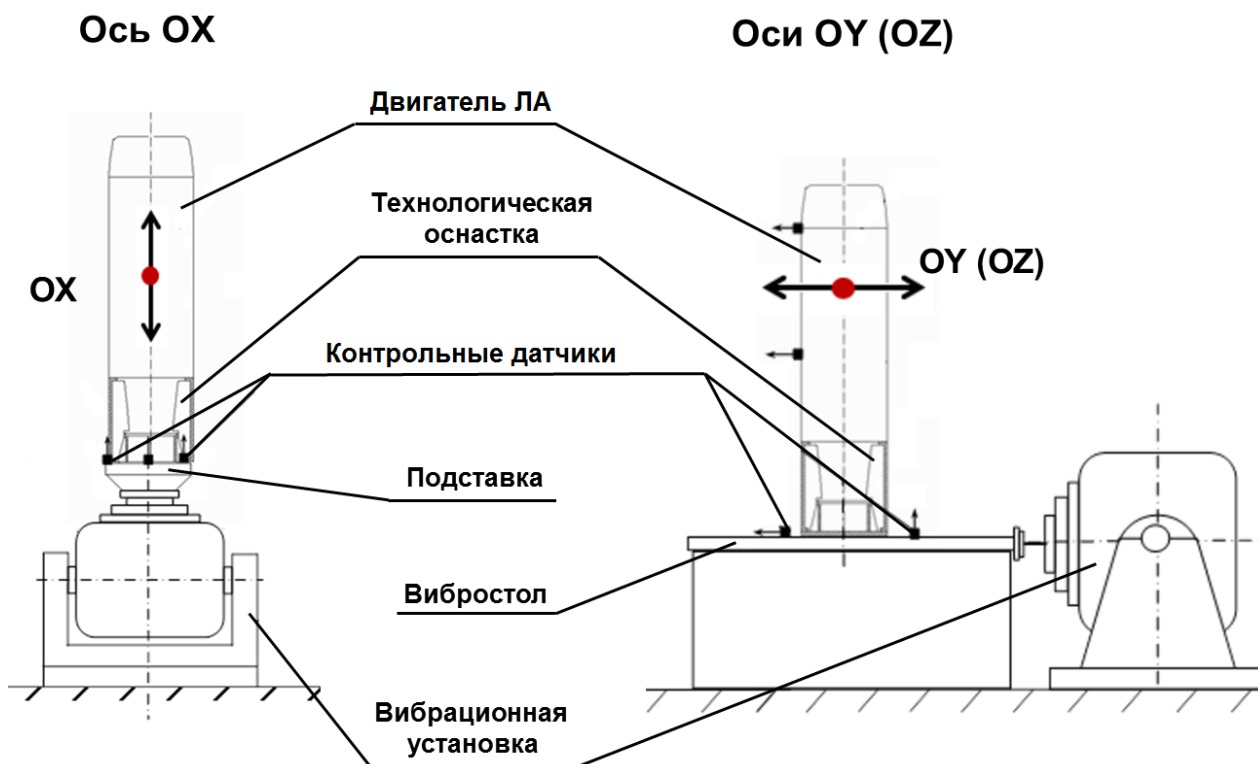


Рис. 1. Схема проведения виброиспытаний двигателя ЛА

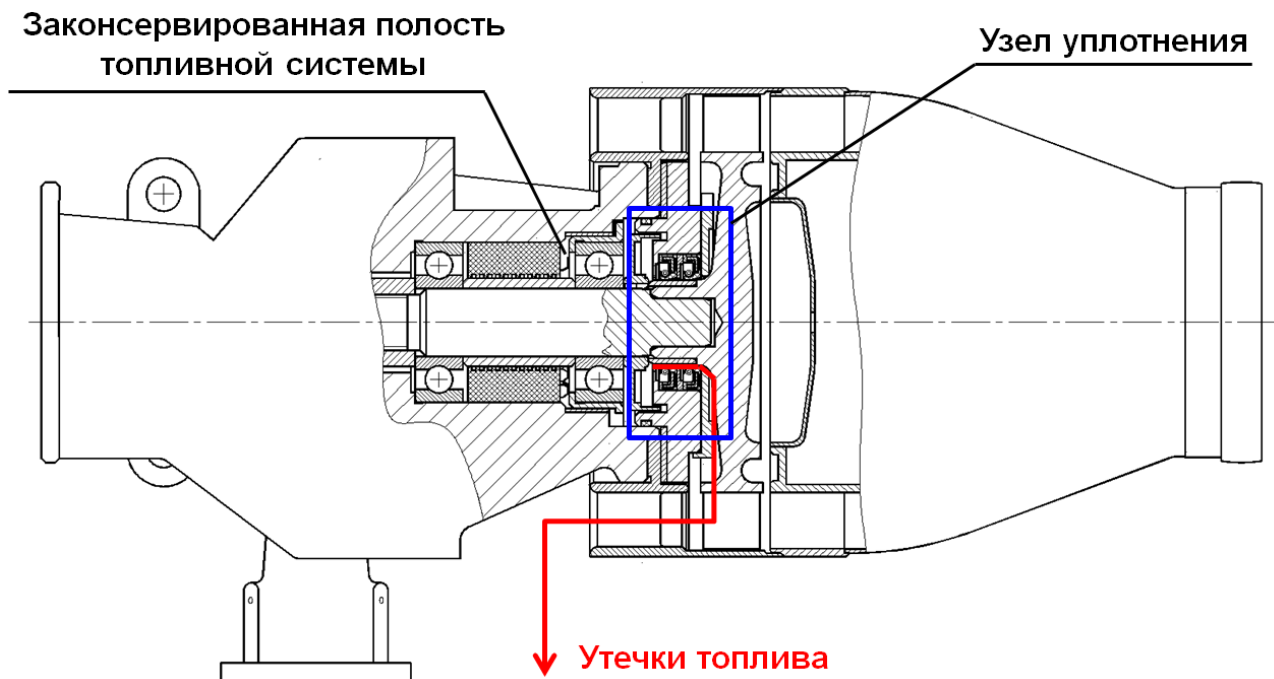


Рис. 2. Продольный разрез турбонасосного агрегата

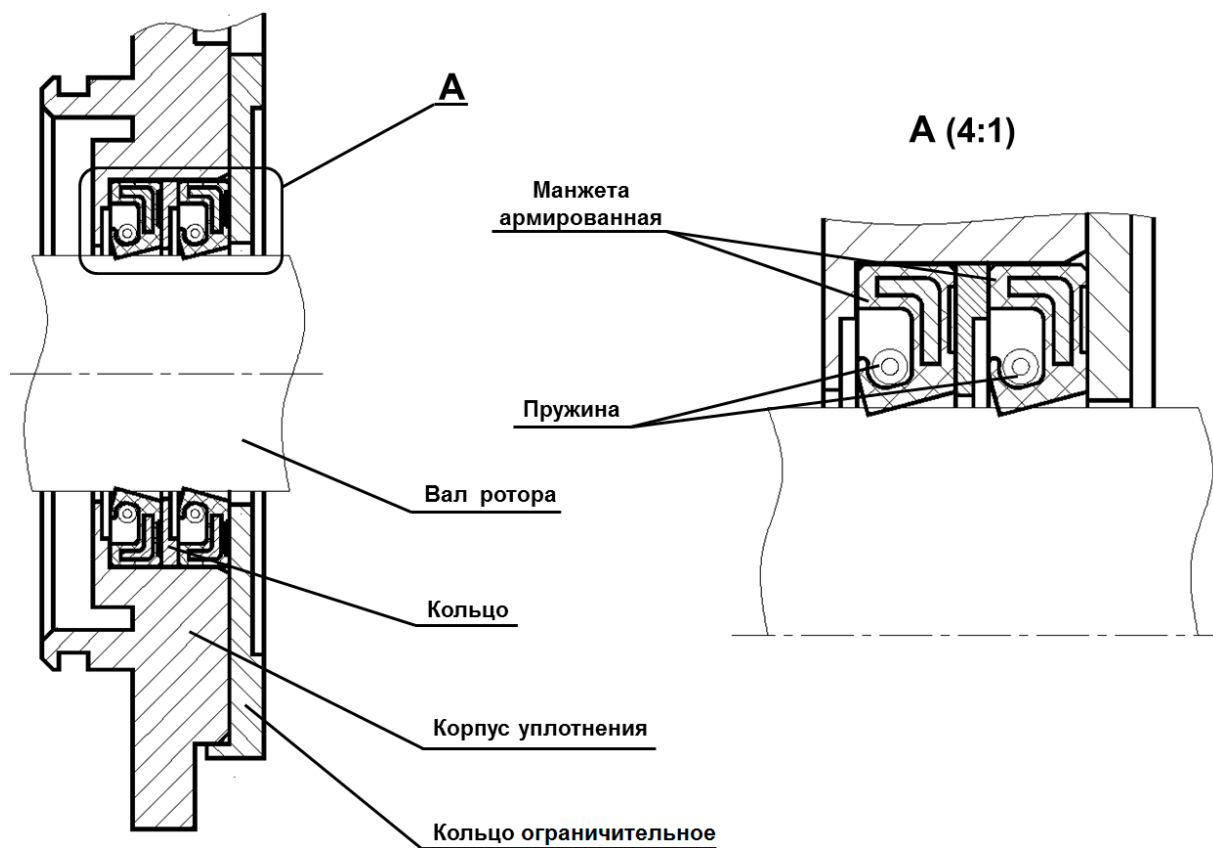


Рис. 3. Конструкция узла уплотнения

В результате проведенных исследований установлено, что негерметичность агрегатов ТНА, ТНГА может возникать в статических и динамических условиях. Это означает, что агрегаты могут быть герметичны в статических условиях при

отсутствии внешних механических воздействий [7] и в то же время негерметичны в динамических условиях при воздействии сильных вибраций, характерных для совместного полета ЛА с самолетом-носителем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Во время проведения виброиспытаний двигателя ЛА на режимах имитирующих совместный полет ЛА с самолетом-носителем (динамические условия) имеет место негерметичность агрегатов ТНА, ТНГА и законсервированной ТС, при этом в статических условиях агрегаты герметичны. Проанализировав конструкцию ТНА, ТНГА, было сформулировано теоретическое объяснение, что причиной негерметичности агрегатов является воздействие вала ротора на контактные кромки манжет в результате высоких вибрационных нагрузок, действующих на двигатель. Механизм возникновения негерметичности ТНА, ТНГА в динамических условиях показан на рис. 4.

Частота и амплитуда колебаний вала ротора (не вращающегося) такова, что манжеты перестают обеспечивать обжатие вала. Контактные кромки манжет не успевают перемещаться за валом ротора, в результате образуется зазор между кромками манжет и валом – появляется течь.

Инерционное воздействие не вращающегося вала ротора на контактные кромки манжет возможно при наличии радиального люфта ротора, представляющего суммарное радиальное перемещение диска турбины в одну и другую сторону. Данный люфт складывается из сумм зазоров между всеми деталями, находящимися между валом ротора и корпусом агрегата. Конструкция опоры ротора с узлом уплотнения в ТНА, ТНГА показана на рис. 5. В конструкции ТНГА радиальный люфт складывается из зазоров между девятью деталями – корпус передний, корпус задний, кольцо упругое, стакан, два подшипника, два колеса насоса и вал ротора, в ТНА из шести – корпус, кольцо упругое, стакан, два подшипника и вал ротора.

Максимальный и минимальный радиальные люфты ротора рассчитываются как суммы зазоров между всеми деталями, расположенными между корпусом агрегата и валом ротора и максимального радиального хода кольца упругого. Установлено, что наибольший вклад в величину радиального

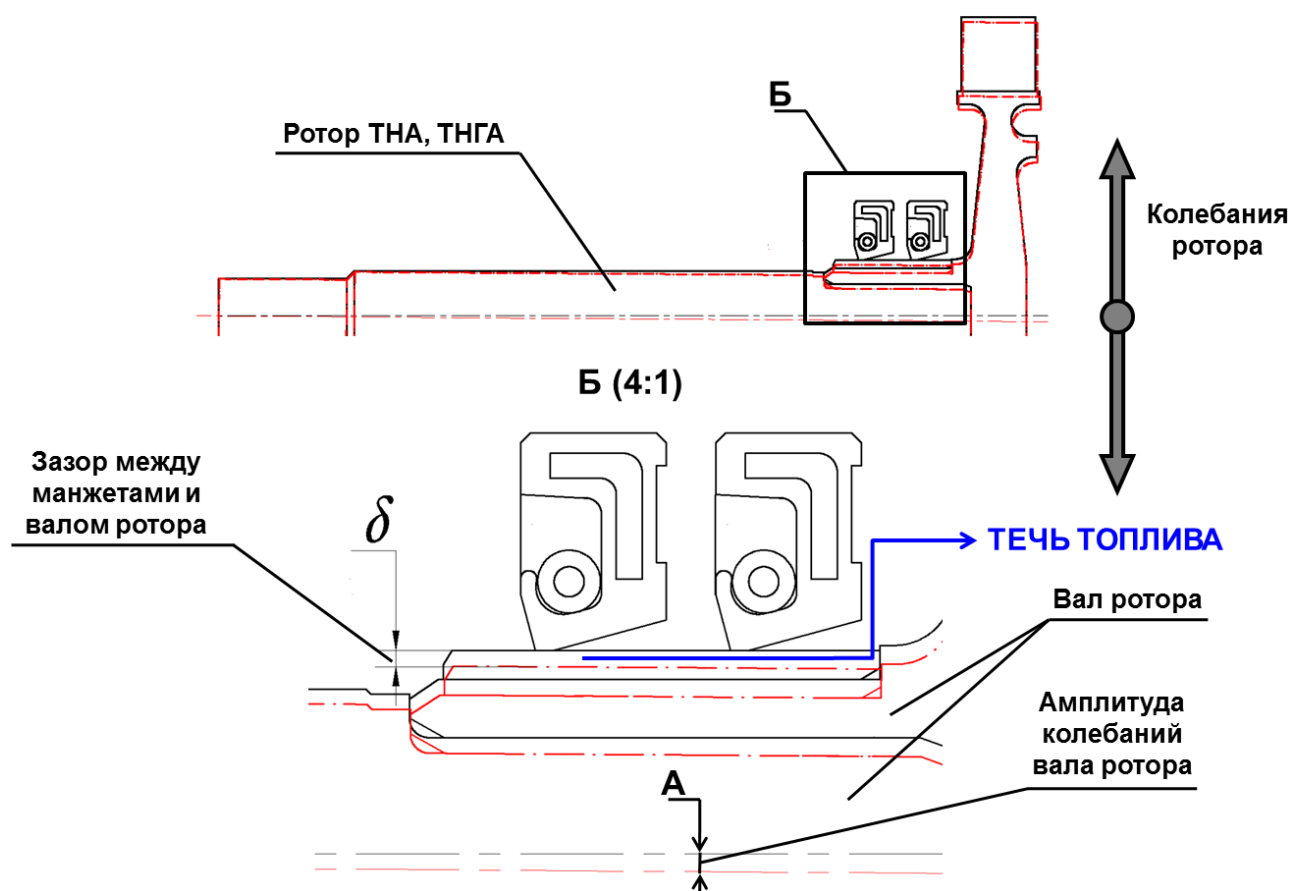


Рис. 4. Механизм возникновения негерметичности ТНА, ТНГА в динамических условиях

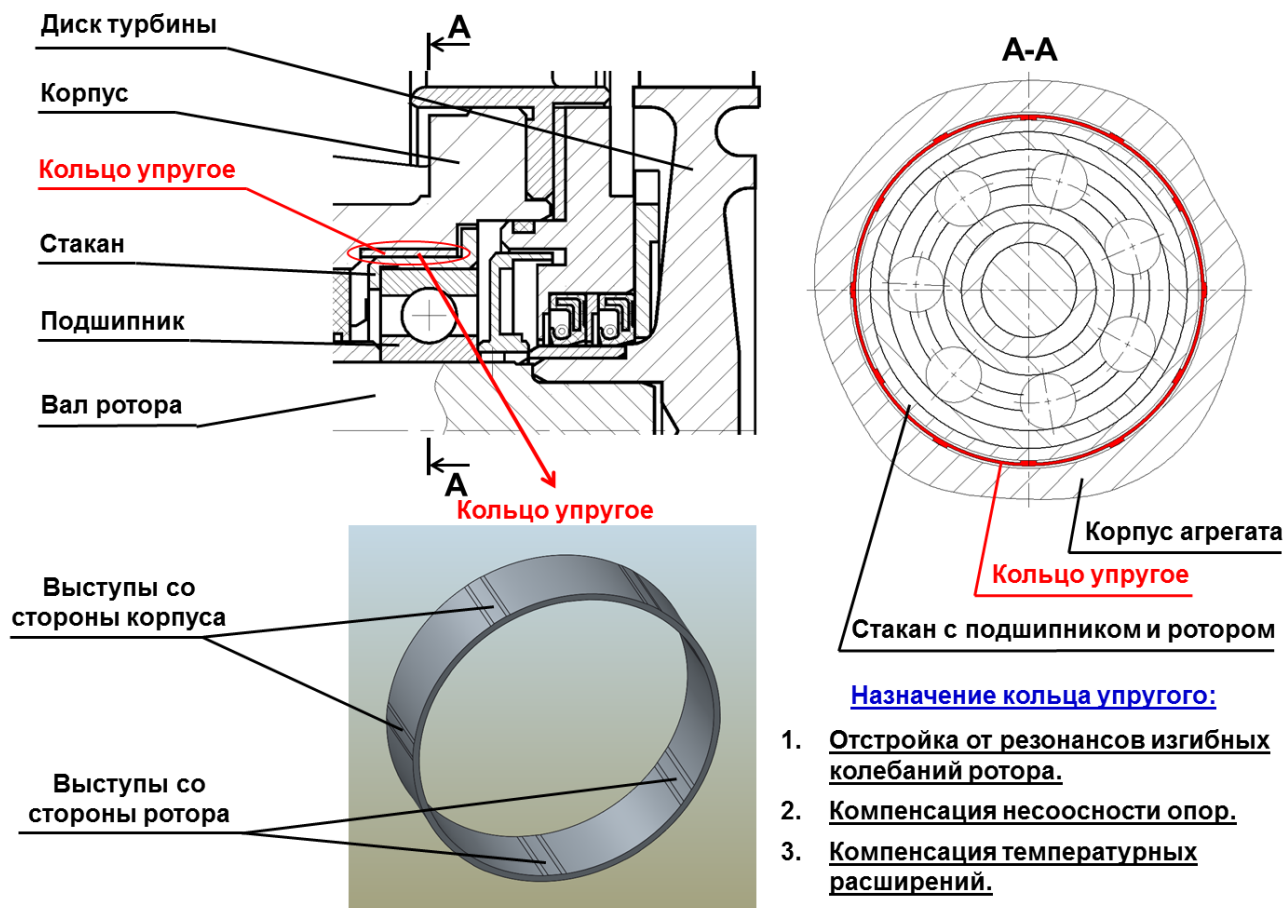


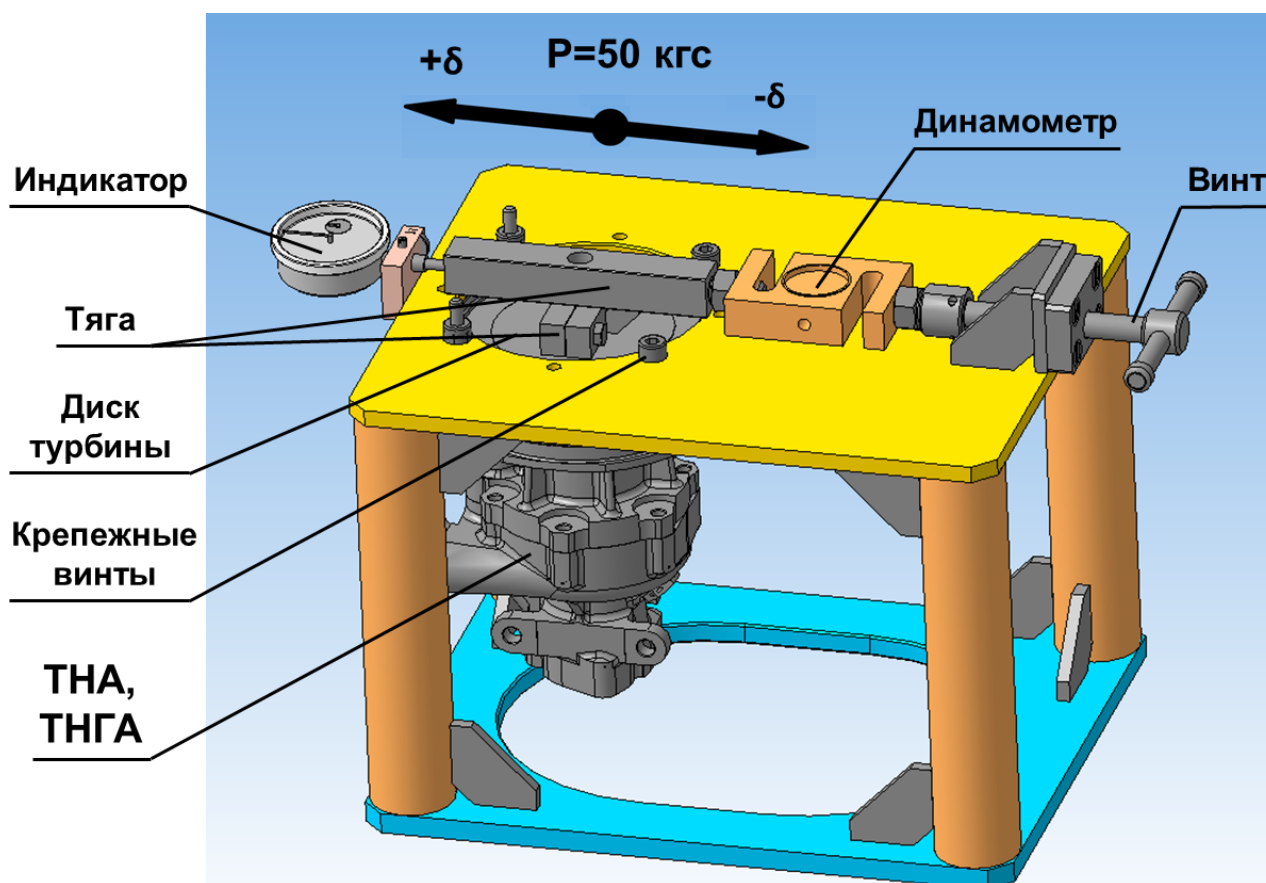
Рис. 5. Конструкция опоры ротора с узлом уплотнения в ТНА, ТНГА

люфта ротора вносит кольцо упругое, по величине столько же, сколько сумма всех зазоров между деталями. Кольцо упругое (рис. 5) на наружной и внутренней сторонах имеет выступы, расположенные друг относительно друга в шахматном порядке. При воздействии силы от вращающегося ротора или при воздействии вибраций на неподвижный ротор происходит радиальное перемещение ротора в пределах высоты выступов кольца упругого и зазоров между деталями. При этом кольцо, обладающее упругими свойствами, гасит колебания ротора. Таким образом, производится отстройка от резонансов изгибных колебаний ротора. Кроме этого, кольцо упругое выполняет еще две важные функции: компенсирует несоосности опор и температурные расширения в агрегате.

На практике фактический радиальный люфт ротора может отличаться от расчетного, так как на люфт влияет также качество изготовления деталей. Поэтому после сбор-

ки агрегата требуется контролировать фактический люфт ротора.

Для определения радиального люфта ротора нужно приложить к диску турбины определенное усилие, обеспечивающее полный выбор всех зазоров между деталями. Полный выбор зазоров является главным условием измерения истинного значения люфта ротора. Для измерения радиального люфта роторов ТНА, ТНГА спроектировано и изготовлено приспособление (рис. 6), представляющее собой сварную раму с круглым вырезом для доступа к диску турбины. К раме агрегат крепится неподвижно крепежными винтами. Для измерения радиального люфта ротора к диску турбины в плоскости диска прикладывается усилие вращением регулировочного винта. С использованием динамометра, от которого показания выводятся на электронное табло, измеряется усилие, прикладываемое к диску турбины, и выставляется его нужная величина.



$$\text{Радиальный люфт ротора: } \sum \delta = \delta + | - \delta |$$

Рис. 6. Приспособление для измерения радиального люфта роторов ТНА, ТНГА

Экспериментально определено, что для корректного измерения радиального люфта ротора к диску турбины нужно прикладывать усилие 50 кгс, обеспечивающее полный выбор всех зазоров между деталями агрегата. Данное усилие определено приложением к диску турбины в плоскости диска в одну, а затем другую сторону плавно нарастающего усилия до остановки стрелки индикатора, свидетельствующего о полном выборе зазоров между деталями агрегата. В момент остановки стрелки индикатора проводилась фиксация прикладываемого усилия. Для объективного определения усилия измерения выполнены на нескольких агрегатах ТНА, ТНГА.

На приспособлении проведены измерения радиальных люфтов большого количества ТНА, ТНГА. Полученные статистические данные показали, что радиальный люфт δ серийно изготавливаемых роторов ТНА, ТНГА находится в диапазоне от 0,14 до 0,76 мм.

Для исследования влияния радиального люфта роторов ТНА, ТНГА на течь топлива из агрегатов и законсервированной ТС был создан специальный стенд проверки герметичности агрегатов при воздействии вибраций с имитацией консервации ТС на двигателе ЛА. Имитация консервации ТС выполнялась созданием давления от насоса внутри заправленного топливом агрегата, по величине равным давлению в законсервированной ТС двигателя, при этом агрегат установлен на вибростенде. Испытания проводились на наиболее нагруженных режимах по вибрации, имитирующих взлет-посадку ЛА с самолетом-носителем. Исследования показали, что радиальный люфт ротора влияет на герметичность и интенсивность утечек топлива. На рис. 7 приведена экспериментальная зависимость утечек топлива из ТНА, ТНГА от величины радиального люфта ротора при воздействии вибраций.

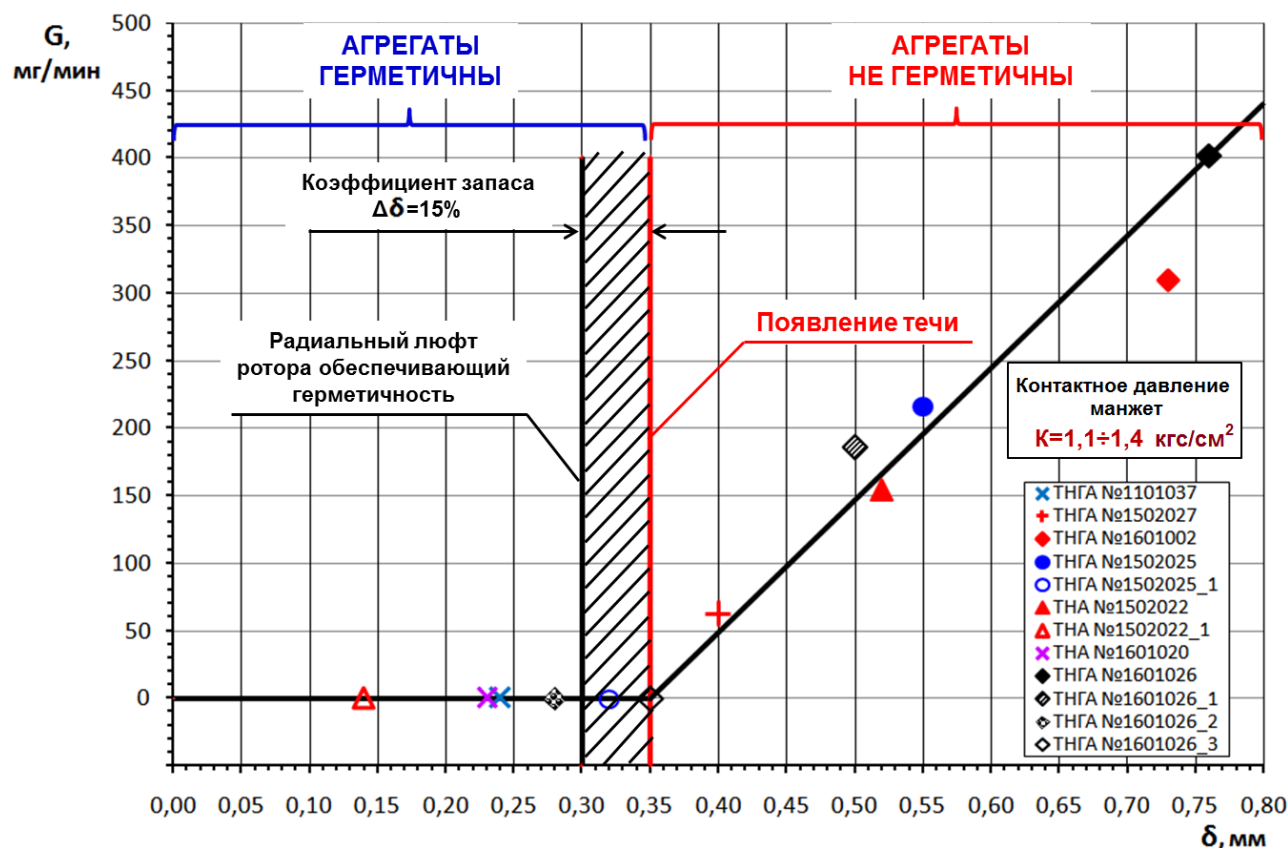


Рис. 7. Зависимость утечек топлива из ТНА, ТНГА от радиального люфта ротора при воздействии вибраций

В результате проведенных исследований установлено, что герметичность агрегатов обеспечивается при радиальном люфте ротора $\delta \leq 0,35$ мм, при $\delta > 0,35$ мм появляется течь, усиливающаяся прямо пропорционально увеличению радиального люфта ротора. При этом все испытываемые агрегаты были собраны с манжетами армированными, гарантированно обеспечивающими герметичность в статических условиях (без воздействия вибраций) с контактным давлением манжет $1,1 \div 1,4$ кгс/см² и прошедших проверку на герметичность в статических условиях.

Зная величину радиального люфта ротора $\delta = 0,35$ мм, при превышении которой возникает течь, установлен коэффициент запаса по люфту ротора $\Delta\delta = 15\%$ и определена предельная граница допустимого радиального люфта ротора, равная $\delta = 0,3$ мм.

Для обеспечения радиального люфта роторов ТНА, ТНГА $\delta \leq 0,3$ мм при люфтах серийно изготавливаемых роторов достигающих до $\delta = 0,76$ мм, что в 2,5 раза больше, требуется изменение конструкции агрегатов

и тщательный контроль размеров деталей, влияющих на радиальный люфт ротора.

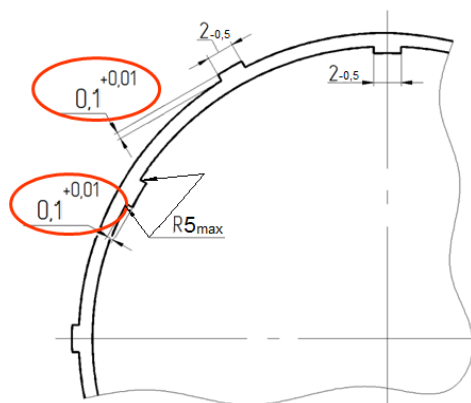
Как было отмечено выше, на радиальный люфт роторов наибольшее влияние оказывает кольцо упругое. В результате расчетов было определено, что радиальный люфт роторов ТНА, ТНГА $\delta \leq 0,3$ мм можно получить уменьшением относительных высот \bar{h} наружных и внутренних выступов кольца упругого, которые рассчитываются по формуле:

$$\bar{h} = \frac{h}{D_{\text{нар}} - D_{\text{вн}}}, \quad (1)$$

где h — высота выступов, мм; $D_{\text{нар}}$ — наружный диаметр кольца упругого, мм; $D_{\text{вн}}$ — внутренний диаметр кольца упругого, мм.

Высота выступов кольца упругого уменьшена с $0,1^{+0,01}$ до $0,04^{+0,01}$ мм при сохранении наружного и внутреннего диаметров, соответственно относительная высота выступов \bar{h} , рассчитанная по формуле (1), уменьшилась с 0,05 до 0,02.

Исходная конструкция



Модернизированная конструкция

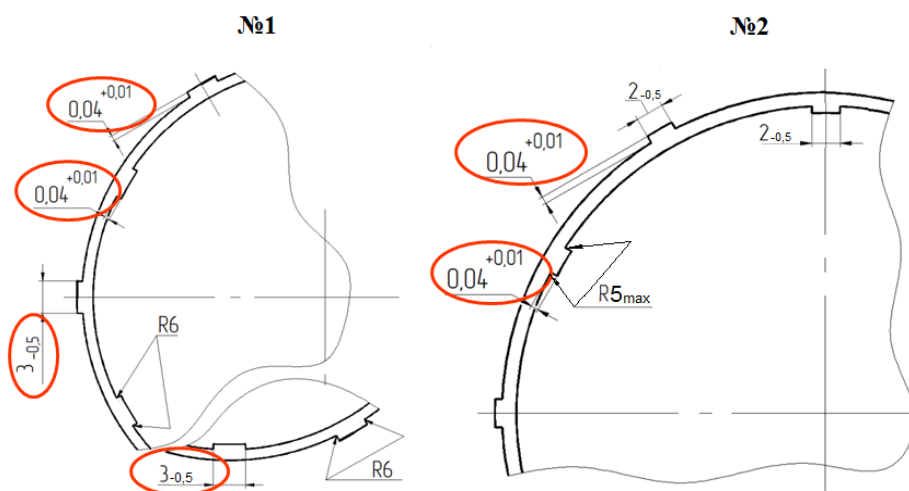


Рис. 8. Кольцо упругое исходной и модернизированной конструкции

Были изготовлены кольцо упругое исходной конструкции и два кольца упругих модернизированной конструкции №1 и №2. Кольцо модернизированное №1 отличается от исходной конструкции уменьшенными относительными высотами \bar{h} наружных и внутренних выступов с 0,05 до 0,02, увеличением ширины выступов с $1,5 \div 2$ до $2,5 \div 3$ и изменением радиусов сопряжений выступов с 5 на 6. Кольцо модернизированное №2 отличается от исходной конструкции уменьшенными относительными высотами \bar{h} наружных и внутренних выступов с 0,05 до

0,02 при сохранении наружного и внутреннего диаметров (рис. 8).

На 5 агрегатах ТНА и 5 агрегатах ТНГА собранных с кольцами упругими модернизированной конструкции №1 и №2 подтверждено обеспечение требуемого для герметичности радиального люфта ротора $\delta \leq 0,3$ мм: в ТНА $\delta_1 \approx 0,20 \div 0,26$ мм, $\delta_2 \approx 0,22 \div 0,27$ мм, в ТНГА $\delta_1 \approx 0,23 \div 0,29$ мм, $\delta_2 \approx 0,24 \div 0,30$ мм; с кольцом упругим исходной конструкции радиальный люфт ротора $\delta > 0,3$ мм: в ТНА $\delta_{исх} \approx 0,4$ мм, в ТНГА $\delta_{исх} \approx 0,55$ мм (приведены в табл. 1).

Таблица 1

Радиальные люфты роторов ТНА, ТНГА с кольцами упругими исходной и модернизированной конструкции №1, №2

ТНА	$\delta_{исх} \approx 0,40$ мм	$\delta_1 \approx 0,20 \div 0,26$ мм	$\delta_2 \approx 0,22 \div 0,27$ мм
ТНГА	$\delta_{исх} \approx 0,55$ мм	$\delta_1 \approx 0,23 \div 0,29$ мм	$\delta_2 \approx 0,24 \div 0,30$ мм

Таким образом, экспериментально подтверждено обеспечение требуемого условия по радиальным люфтам роторов ТНА, ТНГА $\delta \leq 0,3$ мм с кольцами упругими модернизированной конструкции №1 и №2.

Испытания ТНА, ТНГА на герметичность в динамических условиях с имитацией консервации ТС на двигателе ЛА при воздействии сильных вибраций подтвердили надежную герметичность агрегатов с радиальным люфтом роторов $\delta \leq 0,3$ мм, который обеспечивается применением колец упругих с относительными высотами наружных и внутренних выступов $\bar{h} = 0,02$. Результаты проверки надежности работы ТНА, ТНГА с кольцами упругими измененной конструкции показали положительные результаты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований, выполненных экспериментальным методом, получена критериальная зависимость утечек топлива из агрегатов от радиального люфта ротора при высоких вибрационных нагрузках и выделена зона перехода агрегатов из герметичного состояния в негерметичное. Из данной зависимости определено, что для обеспечения герметичности ТНА, ТНГА в динамических условиях должно выполняться условие по радиальному люфту ротора $\delta \leq 0,3$ мм. Для этого в опоре ротора следует применять кольцо упругое с относительными высотами наружных и внутренних выступов $\bar{h} = 0,02$.

Практическое выполнение рекомендаций по обеспечению герметичности ТНА, ТНГА в динамических условиях решило проблему обеспечения герметичности агрегатов и законсервированной ТС двигателя ЛА при совместном полете ЛА с самолетом-носителем и повысило надежность изделий с этими двигателями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Артемов О. А.** Прямоточные воздушно-реактивные двигатели (расчет характеристик): монография. М.: Компания Спутник+, 2006. 374 с. [О. А. Artemov, *Ramjet engines (calculation of characteristics)*, (in Russian). М.: Companya Sputnik+, 2006.]

2. **Скибин В. А., Солонин В. И.** Работы ведущих авиадвигательностроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор). М.: ЦИАМ, 2004. 424 с. [V. A. Skibin, V. I. Solonin, *The works of leading aircraft engine companies to develop advanced aircraft engines (analytical review)*, (in Russian). М.: TsIAM, 2004.]

3. **Теория** и расчет воздушно-реактивных двигателей / В. М. Акимов и др. М.: Машиностроение, 1987, 568 с. [V. M. Akimov, et. al., *Theory and calculation of jet engines*, (in Russian). М.: Mashinostroenie, 1987.]

4. **Осипов Е. В., Ивашин А. Ф.** Обеспечение герметичности законсервированной топливной системы ПВРД в условиях высоких вибронгрузжений // Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XLII Академических чтений по космонавтике. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. С. 422–423. [E. V. Osipov, A. F. Ivashin. "To ensure the tightness canned fuel system of the RAMJET engine in conditions of high vibronic proposals", (in Russian) in *Actual problems of Russian Astronautics*, pp. 422-423, 2018.]

5. **Башта Т. М.** Расчеты и конструкции самолетных гидравлических устройств. М.: Оборонгиз, 1961. 475 с. [T. M. Basta, *Calculations and designs of aircraft hydraulic devices*, (in Russian). М.: Oborongiz, 1961.]

6. **Уплотнения** и уплотнительная техника — справочник / под общ. ред. А. И. Голубева, Л. А. Кондакова. М.: Машиностроение, 1986. 464 с. [Seals and sealing techniques: a Handbook, (in Russian). М.: Mashinostroenie, 1986.]

7. **Обеспечение** герметичности турбонасосных агрегатов в составе двигателей летательных аппаратов / И. А. Кривошеев и др. // Вестник ПНИПУ, 2018. № 54. С. 105–114. [I. A. Krivosheev, et. al., "To ensure the tightness of the turbopump assemblies within aircraft engines", (in Russian), in *Vestnik PNIPU*, no. 54, pp. 105-114, 2018.]

ОБ АВТОРАХ

КРИВОШЕЕВ Игорь Александрович, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры АД УГАТУ.

ИВАШИН Александр Федорович, главный специалист филиала АО «ВПК «НПО машиностроения» – КБ «Орион».

ОСИПОВ Евгений Владимирович, канд. техн. наук, вед. инж.-констр. филиала АО «ВПК «НПО машиностроения» – КБ «Орион».

ЧЕБАКОВ Александр Владимирович, заместитель начальника отделения – начальник отдела АО «ВПК «НПО машиностроения».

METADATA

Title: To ensure the tightness of the turbopump assemblies within the engines of aircraft when exposed to high vibration loads.

Authors: I. A. Krivosheev¹, A. F. Ivashin², E. V. Osipov³, A. V. Chebakov⁴

Affiliation:

¹ Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

^{2,3} KB "Orion" – branch of JSC "MIC "NPO mashinostroeniya", Russian.

⁴ JSC "MIC "NPO mashinostroeniya", Russian.

Email: ¹krivoshe777@mail.ru, ³evgeny.osipov@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik USATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 22, no. 4 (82), pp. 70-79, 2018. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The paper deals with the problems of ensuring the tightness of the turbo-pump unit (TNA) and the turbo-pump hydraulic unit (TNGA) of the canned fuel system (TS) of a dynamically high-loaded aircraft engine (LA). The purpose of the work is to study the influence of various factors on the tightness of TNA, TNGA under the influence of vibration and the development of criteria for ensuring tightness. Taking into account the influence on the tightness of the aggregates of many factors that are not possible to take into account in the calculations, experimental methods of research are used in the work. According to the experimental points, the criterion dependence of fuel leaks on the radial backlash of the rotor is constructed and the transition zone of the units from the hermetic to the

non-hermetic state is distinguished. Design and production of TNA, TNGA with application of the developed criteria provided reliable tightness of units at influence of vibrations and increased reliability of products with their application.

Key words: tightness; reinforced cuff; turbo-pump unit; vibration load; radial backlash of the rotor; measurement; reliability.

About authors:

KRIVOSHEEV, Igor Aleksandrovich, Dr. sci. Sciences, Professor, Professor USATU.

IVASHIN, Alexander Fedorovich, Chief specialist of JSC "MIC "NPO mashinostroeniya" – KB "Orion".

OSIPOV, Evgeny Vladimirovich, kand. Techn. Sciences, leading eng. - constr. JSC "MIC "NPO mashinostroeniya" – KB "Orion".

CHEBAKOV, Alexander Vladimirovich, Deputy head of Department – head of the Department of JSC "MIC "NPO mashinostroeniya".