DOI: 10.15593/2224-9982/2018.54.09

УДК 53.06

И.А. Кривошеев¹, А.Ф. Ивашин², Е.В. Осипов², А.В. Чебаков³

¹ Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

² АО ВПК «НПО машиностроения» – филиал Конструкторское бюро «Орион»,
Оренбург, Россия

³ АО ВПК «НПО машиностроения», Реутов, Московская область, Россия

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ТУРБОНАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ В СОСТАВЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Рассматривается проблема создания герметичного турбонасосного агрегата (ТНА) в составе ЖРД (жидкостного ракетного двигателя) или ПВРД (прямоточного воздушно-реактивного двигателя) летательного аппарата (ЛА) специального назначения и представлены способы ее решения. Такой ЛА перед применением может длительное время находиться в режиме ожидания, поэтому герметичность важна как при незапущенном двигателе, так и при его работе. В связи с этим проведено исследование влияния различных факторов на герметичность ТНА двигателя летательного аппарата (ДЛА) и разработаны критерии, обеспечивающие надежную герметичность. Учитывая влияние на герметичность ТНА множества разных факторов, таких как точность геометрии, давление, температура, время выдержки при прессовании и вулканизации манжет, воздействие на манжеты разного давления при выходе агрегата на рабочие режимы и остаточного дисбаланса ротора турбины, которые не поддаются полному учету при расчетах, для их исследования применены экспериментальные методы. В результате выполненных исследований установлено, что для обеспечения надежной герметичности ТНА теплового ДЛА оптимальное значение контактного давления уплотнительных манжет находится в диапазоне $K_{\text{опт}} = 1,1 \dots 1,4 \text{ кгс/см}^2$. Контроль уплотняющей способности манжет следует проводить методом измерения контактного давления уплотняющих кромок манжет. При этом контактную кромку следует формировать режущим инструментом на станке. Изготовление контактной кромки в пресс-форме неприемлемо из-за необеспечения требуемого контактного давления и качества геометрии контактной кромки манжеты. Конструирование ТНА с учетом разработанных критериев обеспечило 100 % герметичности ТНА, устранило переборку и повторные испытания производимых агрегатов и повысило надежность ДЛА с этими агрегатами.

Ключевые слова: герметичность, надежность, манжета армированная, контактное давление, измерение, турбонасосный агрегат, топливная система.

I.A. Krivosheev¹, A.F. Ivashin², E.V. Osipov², A.V. Chebakov³

¹ Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

² AO VPK "NPO Mashinostroyeniya" - branch of Design office "Orion",
Orenburg, Russian Federation

³ AO VPK "NPO Mashinostroyeniya", Reutov, Moscow region, Russian Federation

TO ENSURE THE TIGHTNESS OF THE TURBOPUMP ASSEMBLIES WITHIN THE ENGINES AIRCRAFT

The article deals with the problem of creating a sealed turbo-pump unit (TNA) as part of the liquid propellant rocket engine (liquid propellant rocket engine) or RAMJET (ramjet engine) aircraft (LA) for special purposes and presents ways to solve the problem. Such AIRCRAFT before use can be in standby mode for a long time, so the tightness is important both when the engine is not started and when it is working. In this regard, the study of the influence of various factors on the tightness of the TNA engine of the aircraft (DLA) and the development of criteria to ensure reliable tightness. Taking into account the influence of many different factors on the tightness of the TNA, such as: the accuracy of geometry, pressure, temperature, holding time during pressing and vulcanization of the cuffs, the impact on the cuffs of different pressures at the output of the unit on the operating modes and the residual imbalance of the turbine rotor, which can not be fully taken into account in the calculations. Experimental methods were used for their research. As a result of the performed studies it was found that to ensure reliable tightness of the heat pump, the optimal value of the contact pressure of the sealing cuffs is in the range of $COPT=1,1 \div 1,4 \text{ kgf/cm}^2$. Control of the sealing capacity of the cuffs should be carried out by measuring the contact pressure of the sealing edges of the cuffs. Thus the contact edge should be formed by the cutting tool on the machine. Production of the contact edge in the mold is unacceptable because of not providing the required contact pressure and the quality of the geometry of the contact edge of the cuff. The design of the TNA based on the developed criteria provided 100% tightness of the TNA, eliminated the bulkhead and repeated tests of the produced units and increased the reliability of the DLA with these units.

Keywords: tightness, reliability, reinforced cuff, contact pressure, measurement, turbo-pump unit, fuel system.

Введение

На сегодняшний день достигнуты высокие результаты в области разработки материалов и технологий изготовления из них изделий, в том числе резиновых уплотнений для герметизации вращающихся валов и неподвижных соединений [1]. Вместе с тем проблема обеспечения надежной герметичности агрегатов современных ДЛА существует. Так, при изготовлении ТНА в составе ДЛА специального назначения (ЖРД и ПВРД) большой проблемой является возникновение негерметичности агрегатов до и после проведения испытаний по проверке их работоспособности. Согласно статистическим данным, при изготовлении до 30 % собранных агрегатов могут иметь негерметичность. В результате производится разборка агрегатов, замена армированных манжет, уплотняющих вал [2–6] на новые, повторные сборка, испытания на герметичность, проверка работоспособности и повторная проверка герметичности. Таким образом, при изготовлении ТНА до последнего времени имели место большие непроизводительные затраты средств и времени. Не исключается возможность появления негерметичности после установки ТНА на ДЛА при хранении и применении по назначению с сопутствующим снижением надежности двигателей. В связи с этим авторами проведено исследование влияния различных факторов на герметичность ТНА в составе ДЛА и разработаны критерии, обеспечивающие его надежную герметичность. При этом проанализированы проблемы обеспечения герметичности законсервированной топливной системы (ТС) ТНА; исследованы факторы и причины, влияющие на герметичность ТНА. Согласно [7–12] возникновение негерметичности может быть вызвано как износом манжетных уплотнений, так и отклонением геометрии при изготовлении, а также другими причинами. В данной работе выполнены исследования и разработаны критерии и способы обеспечения герметичности; испытаниями подтверждена надежность агрегатов измененной конструкции.

Объект и методы исследований

Объект исследований представляет собой ТНА (рис. 1) для ЖРД или ПВРД. На рисунке показано место, где при хранении или работе ДЛА наблюдаются утечки топлива. Топливо из законсервированной ТС вытекает через армированные манжеты узла уплотнения, между уплотняющими кромками манжет и валом ротора.

Рис. 1. Турбонасосный агрегат

В конструкцию узла уплотнения (рис. 2) входят две армированные манжеты с браслетными пружинами, разделенные между собой кольцом. Манжеты установлены в корпус уплотнения и зафиксированы от осевого перемещения ограничительным кольцом. На герметичность ТНА влияет множество разных факторов, таких как точность геометрии, давление, температура, время выдержки при прессовании и вулканизации манжет, воздействие на манжеты разного давления при выходе агрегата на рабочие режимы и воздействие остаточного дисбаланса ротора турбины [13–16], которые не поддаются полному учету при расчетах. Для их исследований применены экспериментальные методы.

Выполненные исследования показали, что наилучшее качество и точность размеров контактной кромки манжет достигается при их изготовлении на токарном станке путем механической обработки контактной кромки режущим инструментом. Получить качественную контактную кромку манжеты в пресс-форме не удастся, так как размеры манжеты малы и при изготовлении контактной кромки в пресс-форме часто происходит ее коробление. В результате контактная кромка имеет эллипсную форму, что не обеспечивает равномерного прилегания кромки к валу, и возникает течь.

Рис. 2. Конструкция узла уплотнения

Проанализирован существующий метод контроля внутреннего диаметра $D_{\text{вн}}$ контактной кромки манжеты (определяющий герметичность) на мерительном конусе. Данный метод имеет следующие недостатки:

- грубая цена деления мерительного конуса, обычно не менее 0,1 мм;
- большое влияние человеческого фактора при измерениях, так как манжету нужно помещать на конус под собственным весом, градация шкалы на конусе мелкая;
- при измерениях на конусе не учитывается возможная эллипсность уплотняющей кромки манжеты;

– при измерениях на конусе не учитывается твердость резины, зависящая от партии материала, вальцевания резины, соблюдения технологии изготовления манжеты (давление, температура, время выдержки при прессовании и вулканизации).

Перечисленные недостатки приводят к низкой точности контроля уплотняющей способности манжет. В связи с этим метод контроля внутреннего диаметра манжеты на мерительном конусе может использоваться только как предварительный.

Введено понятие контактного давления рабочего пояса для рассматриваемой уплотнительной манжеты – степень обжатия манжетой вала [17]. Для контроля качества изготовления манжет внедрен метод контроля контактного давления рабочей кромки манжеты.

Экспериментальная установка для контроля уплотнительных манжет

Создана специальная установка (рис. 3) для контроля герметизирующих свойств манжет путем измерения контактного давления рабочей кромки.

Манжета армированная устанавливается без пружины на калибр – имитатор вала. Для обеспечения надежной герметизации между корпусом установки и манжетой армированной устанавливается резиновая прокладка. Манжета фиксируется прижатием к корпусу установки усилием F от прижимной шайбы при помощи винта.

Рис. 3. Схема экспериментальной установки для проверки герметизирующих свойств уплотнительных манжет

Установка работает следующим образом. От источника питания на редуктор подается давление воздуха $P_{вх}$. Давление контролируется по манометру источника питания. Редуктор настраивается по манометру МН1 на давление перед дросселем $P_{вых}$. После этого фиксируется показание манометра МН2. В зависимости от значения контактного давления рабочая кромка манжеты отжимается от калибра на величину ΔS . При этом перед манжетой в измерительной камере устанавливается определенное давление, значение которого является мерой контактного давления K .

Исследование взаимосвязи контактного давления рабочей кромки манжеты с ее внутренним диаметром

Проанализированы серийно изготовленные армированные манжеты с контактными кромками, полученными механической обработкой и в пресс-форме. По результатам построена зависимость контактного давления рабочей кромки манжеты от ее внутреннего диаметра $K = f(D_{\text{вн}})$ (рис. 4) во всем диапазоне поля допуска на внутренний диаметр $D_{\text{вн}} = 20,3 \pm 0,2$.

Рис. 4. Зависимость контактного давления рабочей кромки манжеты от ее внутреннего диаметра

Установлено, что данному полю допуска соответствует очень широкий диапазон контактного давления $\Delta K = 1,0$ кгс/см², а диапазоны контактного давления манжет для одинаковых значений внутреннего диаметра имеют большой разброс – $\Delta K = 0,2 \dots 0,4$ кгс/см², что говорит о низкой точности контроля уплотняющей способности манжет измерением внутреннего диаметра. Наибольший разброс контактного давления имеют манжеты, изготовленные в пресс-форме $\Delta K = 0,4$ кгс/см², также эти манжеты часто имеют контактную кромку эллипсной формы. Данный факт говорит о нецелесообразности получения контактной кромки в пресс-форме. Наибольшая точность получения контактной кромки достигается механической обработкой на станке с использованием режущего инструмента.

Исследование в составе ТНА герметичности манжетных уплотнений с разной величиной контактного давления рабочей кромки

Зависимость герметичности агрегатов от контактного давления устанавливаемых манжет показана на рис. 5. Исследованы манжеты с контактным давлением в диапазоне от 0,5 до 2,0 кгс/см².

Рис. 5. Зависимость герметичности агрегатов от контактного давления устанавливаемых манжет

Исследования показали, что все агрегаты с установленными манжетами с контактным давлением ниже $1,0 \text{ кгс/см}^2$ не герметичны из-за недостаточно создаваемого усилия обжатия кромкой манжеты. Все агрегаты с манжетами с контактным давлением выше $1,7 \text{ кгс/см}^2$ также негерметичны из-за перегрева и «сгорания» уплотняющей кромки манжеты при вращении вала в результате сверхбольшого усилия обжатия манжетами вала. Состояние контактной кромки манжеты после испытаний показано на рис. 6, а, вал с наплавившейся контактной кромкой манжеты показан на рис. 6, б. Герметичность агрегатов достигнута с манжетами, имеющими контактное давление в диапазоне от $1,0$ до $1,7 \text{ кгс/см}^2$. От нижней и верхней переходных границ с коэффициентами запаса, соответственно $\approx 10\%$ и $\approx 20\%$, отложены пунктирные линии, ограничившие зону оптимального контактного давления $K_{\text{опт}} = 1,1 \dots 1,4 \text{ кгс/см}^2$ (показана штриховкой). Данный диапазон получен экспериментальным методом. Практика подтвердила надежную герметичность агрегатов и законсервированной ТС с манжетными уплотнениями в данном оптимальном диапазоне контактного давления.

а

б

Рис. 6. Состояние контактной кромки манжеты и вала после испытаний агрегата с манжетами с контактным давлением $K > 1,7 \text{ кгс/см}^2$: а – контактная кромка манжеты; б – вал

Рис. 7. Зависимость контактного давления уплотняющих кромок манжет от их внутреннего диаметра

Чтобы определить величину внутреннего диаметра манжеты $D_{\text{вн}}$, соответствующую оптимальному контактному давлению $K_{\text{опт}} = 1,1 \dots 1,4$ кгс/см², были проведены экспериментальные исследования и построена зависимость контактного давления уплотняющих кромок манжет от их внутреннего диаметра $D_{\text{вн}}$ (рис. 7). Диаметр вала, используемый в исследованиях, $D_{\text{вн}} = 21$ мм. Из графика установлено, что оптимальному контактному давлению $K_{\text{опт}} = 1,1 \dots 1,4$ кгс/см² соответствует внутренний диаметр манжеты с полем допуска $D_{\text{вн}} = 20,3_{-0,3}$ мм.

Выводы

В результате выполненных исследований установлено, что для обеспечения надежной герметичности ТНА теплового ДЛА специального назначения (в составе ЖРД или ПВРД) контактное давление уплотнительных манжет должно находиться в определенном оптимальном диапазоне $K_{\text{опт}} = 1,1 \dots 1,4$ кгс/см².

Контроль уплотняющей способности манжет следует проводить методом измерения контактного давления уплотняющих кромок манжет. В связи с низкой точностью метод контроля уплотняющей способности манжет на мерительном конусе может использоваться только как предварительный.

Контактную кромку манжет следует формировать режущим инструментом на станке. Изготовление контактной кромки в пресс-форме неприемлемо, так как не обеспечивается требуемая контактная нагрузка, и в ≈ 50 % случаев контактная кромка получается эллипсной формы.

Результаты исследований внедрены в производство, что обеспечило надежную герметичность агрегатов до и после проверки работоспособности при высоких частотах вращения ротора турбины. За контрольный период изготовления и испытаний агрегатов не выявлено ни одного случая утечки топлива.

Конструирование ТНА с учетом разработанных критериев снизило затраты на изготовление агрегатов и повысило надежность ДЛА с этими агрегатами.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № 1(34). – С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33
2. Башта Т.М. Расчеты и конструкции самолетных гидравлических устройств. – М.: Оборонгиз, 1961. – 475 с.
3. Абрамов Е.И., Колесниченко К.А., Маслов В.Т. Элементы гидропривода: справочник. – Киев: Техника, 1969. – 319 с.
4. Бухина М.Ф. Техническая физика эластомеров. – М.: Химия, 1984. – 224 с.
5. Контактные уплотнения вращающихся валов / Г.А. Голубев, Г.М. Кукин, Г.Е. Лазарев, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1976. – 264 с.
6. Макаров Г.В. Уплотнительные устройства. – Л.: Машиностроение, 1973. – 232 с.
7. Айинбиндер С.Б., Тюнина Э.Л., Цируле К.И. Свойства полимеров в различных напряженных состояниях. – М.: Химия, 1981. – 232 с.
8. Бартенев Г.М., Лаврентьев В.В. Трение и износ полимеров. – М.: Химия, 1972. – 240 с.
9. Особенности рецептур резин на основе этиленпропиленовых каучуков и их применение в изделиях специального назначения / Е.В. Алифанов, А.М. Чайкун, М.А. Бенедиктова, И.С. Наумов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № 2(35). – С. 51–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-51-55
10. Резины с пониженной горючестью / И.С. Наумов, А.П. Петрова, С.Л. Барботько, О.А. Елисеев // *Все материалы: энцикл. справочник*. – 2016. – № 4. – С. 27–33.
11. Нудельман З.Н. Совмещение фторкаучуков с другими полимерами // *Каучук и резина*. – 2006. – № 4. – С. 27–37.
12. Белоусов А.И., Фалалеев С.В., Зрелов В.А. Опыт создания уплотнений быстровращающихся валов для авиационных двигателей // *Герметичность, виброненадежность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования: тр. 10-й Междунар. науч.-техн. конф.* – 2002. – Т. 1. – С. 33–39.
13. Осипов Е.В. Методика расчета массы балансировочного пояса ротора турбины // *Итоги диссертационных исследований: материалы III Всерос. конкурса молодых ученых*. Т. 1. – М.: Изд-во РАН, 2011. – С. 149–159.
14. Ивашин А.Ф., Осипов Е.В. Оптимизация применения балансировочного оборудования на примере станка ВМ-010 // *Наука и технологии: материалы XXXIV Всерос. конф., посвященной 90-летию со дня рождения академика В.П. Макеева*. Т. 4. – М.: Изд-во РАН, 2014. – С. 152–159.
15. Ивашин А.Ф., Кривошеев И.А., Осипов Е.В. Оптимизация выбора и использования балансировочного оборудования при изготовлении роторов современных энергетических машин // *Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та*. – 2014. – Т. 10, № 5.1.
16. Гафт Я.З. Сравнительные экономические показатели основных типов уплотнений роторов насосов // *Герметичность, виброненадежность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования: тр. 11-й междунар. науч.-техн. конф.* – 2005. – Т. 1. – С. 38–45.
17. Уплотнения и уплотнительная техника: справочник / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.Б. Овандер, В.В. Гордеев, Б.А. Фурманов, Б.В. Кармугин. – М.: Машиностроение, 1986. – 464 с.

References

1. Kablov E.N. Innovatsionnyye razrabotki FGUP «VIAM» GNTS RF po realizatsii «Strategicheskikh napravleniy razvitiya materialov i tekhnologiy ikh pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative developments of FSUE "VIAM" of the SSC RF for the implementation of "Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030"]. *Aviation materials and technologies*, 2015, №1 (34), pp. 3-33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33
2. Bashta T.M. Raschety i konstruktсии samoletnykh gidravlicheskiykh ustroystv [Calculations and designs of aircraft hydraulic devices]. Moscow, Oborongiz, 1961, 475 p.
3. Abramov E.I., Kolesnichenko K.A., Maslov V.T. Elementy gidroprivoda: Spravochnik [Elements of hydraulic drive: Handbook]. Kiyev: Tekhnika, 1969, 319 p.
4. Bukhina M.F. Tekhnicheskaya fizika elastomerov [Technical Physics of Elastomers]. Moscow, Khimiya, 1984, 224 p.
5. Golubev G.A., Kukin G.M., Lazarev G.E., Chichinadze A.V. Kontaknyye uplotneniya vrashchayushchikhsya valov [Rotary Shaft Contact Seals]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1976, 264 p.

6. Makarov G.V. Uplotnitelnyye ustroystva [Sealing devices]. Leningrad, Mashinostroyeniye, 1973, 232 p.
7. Ayinbinder S.B., Tyunina E.L., Tsurule K.I. Svoystva polimerov v razlichnykh napryazhennykh sostoyaniyakh [Properties of polymers in various stressed states]. Moscow, Khimiya, 1981, 232 p.
8. Bartenev G.M., Lavrentyev V.V. Treniye i iznos polimerov [Friction and wear of polymers]. Moscow, Khimiya, 1972, 240 p.
9. Alifanov E.V., Chaykun A.M., Benediktova M.A., Naumov I.S. Osobennosti retseptur rezin na osnove etilenpropilenovykh kauchukov i ikh primeneniye v izdeliyakh spetsialnogo naznacheniya [Features of rubber formulations based on ethylene-propylene rubbers and their use in special-purpose products]. *Aviation materials and technologies*, 2015, no. 2(35), pp. 51-55. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-51-55
10. Naumov I.S., Petrova A.P., Barbotko S.L., Eliseyev O.A. Reziny s ponizhennoy goryuchestyu [Rubbers with low flammability]. *Vse Materialy. Entsiklopedicheskiy Spravochnik*, 2016, no. 4, pp. 27-33.
11. Nudelman Z.N. Sovmeshcheniye ftorkauchukov s drugimi polimerami [Combining fluororubbers with other polymers]. *Kauchuk i Rezina*, 2006, no. 4, pp. 27-37.
12. Belousov A.I., Falaleyev S.V., Zrelov V.A. Opyt sozdaniya uplotneniy bystrovrashchayushchikhsya valov dlya aviatsionnykh dvigateley [Experience in creating seals for fast rotating shafts for aircraft engines]. *Proceedings of the 10th Int. scientific and technical. Conf. "Germetichnost, vibronadezhnost i ekologicheskaya bezopasnost nasosnogo i kompressornogo oborudovaniya"*, 2002, vol.1, pp. 33-39.
13. Osipov E.V. Metodika rascheta massy balansirovochnogo poyasa rotora turbiny [Method for calculating the mass of the balancing belt of the turbine rotor]. *Itogi dissertatsionnykh issledovaniy. Tom 1. Materialy III Vserossiyskogo konkursa molodykh uchenykh*, Moscow, RAN, 2011, pp. 149-159.
14. Ivashin A.F., Osipov E.V. Optimizatsiya primeneniya balansirovochnogo oborudovaniya na primere stanka BM-010 [Optimization of the application of balancing equipment by the example of the BM-010 machine]. *Nauka i tekhnologii. Materials of the XXXIV All-Russian Conference, dedicated to the 90th anniversary of the birth of Academician V.P. Makeyev*, Moscow, RAN, 2014, pp. 152-159.
15. Ivashin A.F., Krivosheyev I.A., Osipov E.V. Optimizatsiya vybora i ispolzovaniya balansirovochnogo oborudovaniya pri izgotovlenii rotorov sovremennykh energeticheskikh mashin [Optimization of the selection and use of balancing equipment in the manufacture of rotors of modern power machines]. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2014, vol.10, no. 5.1.
16. Gaft Ya.Z. Sravnitelnyye ekonomicheskiye pokazateli osnovnykh tipov uplotneniy rotorov nasosov [Comparative economic indicators of the main types of pump rotor seals]. *Proceedings of the 11th Intern. scientific and technical. Conf. "Tightness, vibro-reliability and ecological safety of pumping and compressor equipment"*, 2005, vol. 1, pp. 38-45.
17. Kondakov L.A., Golubev A.I., Ovander V.B., Gordeyev V.V., Furmanov B.A., Karmugin B.V. Uplotneniya i uplotnitelnaya tekhnika: Spravochnik [Seals and sealing machinery: Handbook]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1986, 464 p.

Об авторах

Кривошеев Игорь Александрович (Уфа, Россия) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры АД ФГБОУ ВО «УГАТУ» (450008, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12; e-mail: krivosheev777@mail.ru).

Ивашин Александр Федорович (Оренбург, Россия) – главный специалист АО ВПК «НПО машиностроения» – филиал Конструкторское бюро «Орион» (460005, г. Оренбург, ул. Шевченко, д. 26).

Осипов Евгений Владимирович (Оренбург, Россия) – кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор АО ВПК «НПО машиностроения» – филиал Конструкторское бюро «Орион» (460005, г. Оренбург, ул. Шевченко, д. 26; e-mail: evgeny.osipov@mail.ru).

Чебаков Александр Владимирович (Реутов, Россия) – начальник отдела АО ВПК «НПО машиностроения» (143966, г. Реутов, Московская область, ул. Гагарина, д. 33).

About the authors

Igor A. Krivosheev (Ufa, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Ufa State Aviation Technical University (12, Karla Marksa st., Ufa, 450008, Russian Federation; e-mail: krivosheev777@mail.ru).

Alexander F. Ivashin (Orenburg, Russian Federation) – Chief Specialist, JSC VPK “NPO Mashinostroyeniya” – branch of Design office “Orion” (26, Shevchenko st., Orenburg, 460005, Russian Federation).

Evgeny V. Osipov (Orenburg, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Leading Engineer-Designer, JSC VPK “NPO Mashinostroyeniya” – Branch of Design Office “Orion” (26, Shevchenko st., Orenburg, 460005, Russian Federation; e-mail: evgeny.osipov@mail.ru).

Alexander V. Chebakov (Reutov, Russian Federation) – Deputy Head of Department, JSC VPK “NPO Mashinostroyeniya” (33, Gagarin st., Reutov, 143966, Russian Federation).

Получено 01.09.18