

## **ВЛИЯНИЕ ТЕРМОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА ГЕРМЕТИЧНОСТИ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ГИДРОСИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Развитие авиационных гидросистем характеризуется непрерывным ростом потребляемой мощности и массы при примерно одинаковых размерах ЛА. Эта проблема стала актуальной уже в 70-е годы прошлого века при проектировании самолетов 4-го поколения. Отборы мощности от авиадвигателя для централизованной гидросистемы на управление рулевыми поверхностями приобрели критическое значение (на некоторых режимах полета до 20%) и стали серьезно влиять на дальность полета, безопасность и экономичность.

Достижения последних лет в областях микропроцессорной техники, силовой электроники и магнитных материалов позволяют кардинально перестроить функциональные системы ЛА и использовать электрическую энергию в качестве единого вида энергии на борту.

В настоящее время ведущими авиационными производителями принята стратегия постепенного перехода на электрические системы управления, сформированная в виде концепции MEA (More Electric Aircraft – более электрифицированного самолета). Благодаря реализации идей MEA в самолёте А-380 удалось уменьшить количество централизованных гидросистем до двух вместо четырех, требуемых для самолётов такого класса [1].

Создание электрогидростатических приводов стало одним из первых достижений инициативы MEA. Этот привод является гидравлическим, однако его гидравлическая часть является автономной и герметизируется встроенным электродвигателем, обеспечивающим перемещение привода. Для работы привода требуется высокое давление (от 35 МПа для самолета А380 до 70 МПа для современных истребителей), которое постоянно поддерживается в ходе эксплуатации [2]. Это делает задачу обеспечения герметичности гидросистем все более актуальной.

В работе [3] отмечено, что при эксплуатации гидравлических систем самолетов число отказов, связанных с потерей герметичности, составляет до 2/3 числа всех отказов. Около 60% выходов из строя узлов ракетных двигателей также связаны с уплотнениями агрегатов [4]. По данным эксплуатирующих фирм ВВС США из общего числа отказов до 50...60% приходится на гидропневмотопливную систему.

До настоящего времени в соединениях трубопроводов гидравлических систем ЛА наиболее часто используются различного рода металл-

металлические уплотнения. Герметичность таких соединений во многом определяется шероховатостью контактных поверхностей.

На современных предприятиях по изготовлению авиационных фитингов применяются высокоточные станки с ЧПУ, широко используются электрохимическое полирование, ультразвуковая очистка с последующей промывкой в дистиллированной воде, сушкой и упаковкой в помещениях с высокой степенью чистоты. На каждом из этапов производства проводится инструментальный контроль качества [5].

Такой процесс позволяет получать изделия высокой точности, соответствующие самым строгим требованиям промышленной чистоты. Однако такой технологический процесс является достаточно дорогим и требует применения высокоточных инструментов.

На отечественных серийных предприятиях изготавливается достаточно большая номенклатура специальных нестандартных фитингов. Из-за ограниченной программы их производства использование описанной выше технологии является нецелесообразным. Термоимпульсный метод в данном случае является разумной альтернативой, обладая универсальностью по форме обрабатываемых деталей, материалам и не требуя какой-либо сложной технологической оснастки [6].

До настоящего времени режимы термоимпульсной обработки не рассматривались с точки зрения требований герметичности соединений трубопроводов ЛА. Для оценки степени такого влияния были проведены исследования, результаты которых представлены в настоящей работе.

Исследование режимов термоимпульсной обработки проводилось на специально изготовленных образцах. Шероховатость боковой поверхности образцов до и после термоимпульсной обработки измерялась путем профилографирования с погрешностью показаний по показывающему прибору 10% и с погрешностью вертикального увеличения 4%. Профилограммы записывались с вертикальным увеличением 500; 1000; 5000; 10000; 50000, с горизонтальным увеличением 20; 200 в зависимости от класса шероховатости.

Результаты экспериментальных исследований приведены на диаграммах сравнения (рис. 1). Уменьшение шероховатости поверхности образцов после обработки наблюдалось на всех режимах. При давлении горючей смеси  $P = 1,13$  МПа и времени воздействия  $t = 0,15$  с наибольший эффект наблюдался для 8-го, 9-го и 11-го классов (соответственно 16%, 16% и 47% снижения шероховатости). На режимах  $P = 0,85$  МПа и  $t = 0,08$  с лучшие результаты также показали образцы с шероховатостью 8-го, 9-го и 11-го классов (снижение шероховатости на 16%, 21% и 36% соответственно). При режиме  $P = 1,21$  МПа и  $t = 0,03$  с значительное снижение высоты неровностей произошло с 8-го по 11-й класс (на 17%, 16%, 40% и 50% соответственно). При режиме  $P = 1,14$  МПа и  $t = 0,04$  с наибольший эффект получился для поверхностей 9-го (16%) и 11-го (41%) классов.

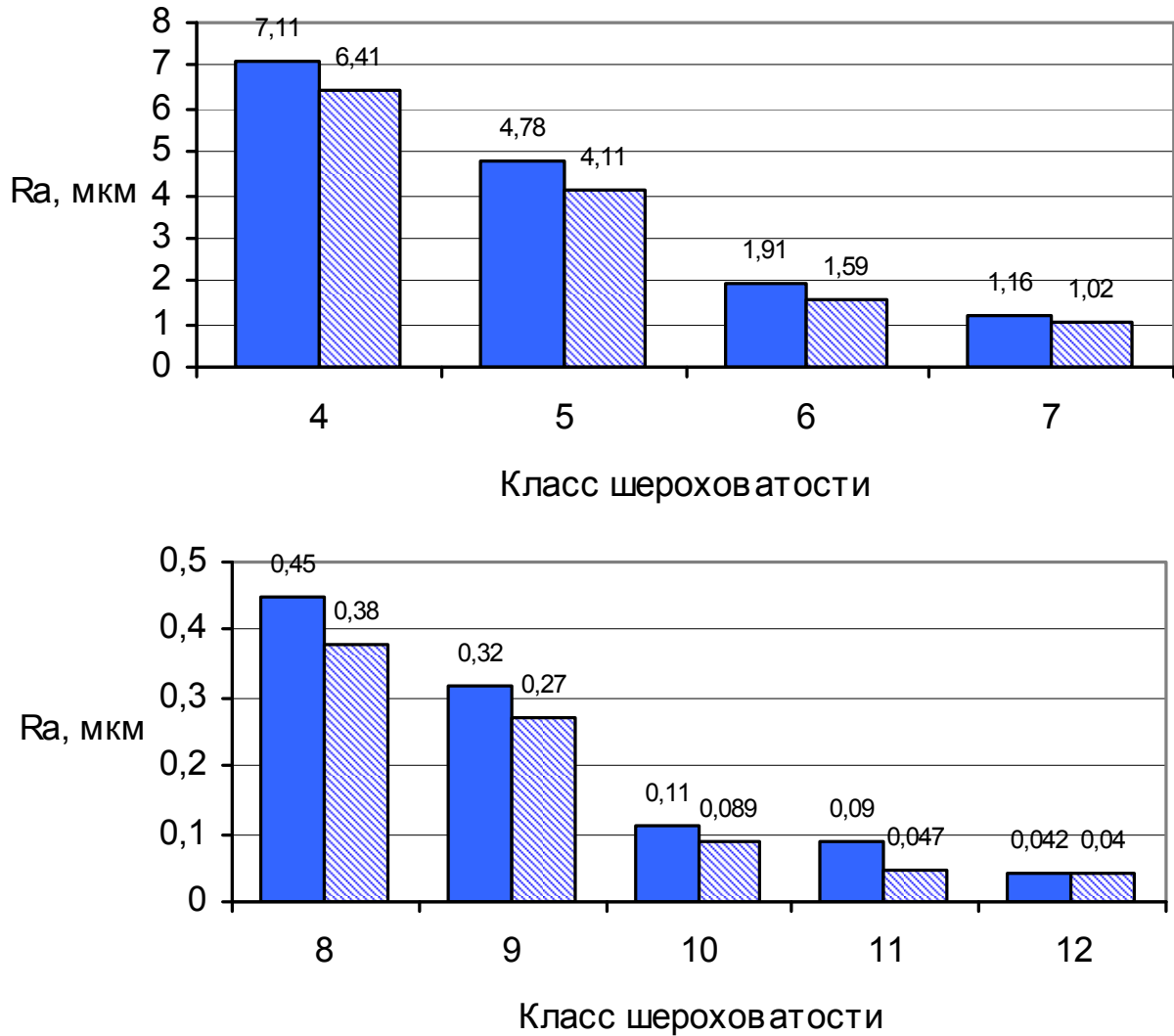


Рисунок 1 – Диаграммы сравнения шероховатости образцов при  $P_{см} = 1,13$  МПа,  $t = 0,15$  с : ■ – до обработки; ▨ – после обработки

Особого внимания заслуживают результаты, полученные при обработке образцов с поверхностью 12-го класса чистоты. На них шероховатость практически не изменяется или даже увеличивается. Этот факт находит свое объяснение: при микрофотографировании рельефа поверхности (рис. 2) на снимке ясно видна пленка, оставленная на поверхности притиром. После термоимпульсной обработки пленка исчезает и открывается истинный микрорельеф, дающий увеличение высоты микронеровностей. При увеличении мощности источника (роста давления смеси) происходит уменьшение шероховатости и на образцах, обработанных чугуном притиром (класс шероховатости 12).

Изменение времени контакта продуктов сгорания с обрабатываемыми деталями от 0,03 до 0,15 секунд показало, что его увеличение более чем на 0,08 секунды сказывается на чистоте поверхностей – увеличивается загрязнение поверхностей оксидами.

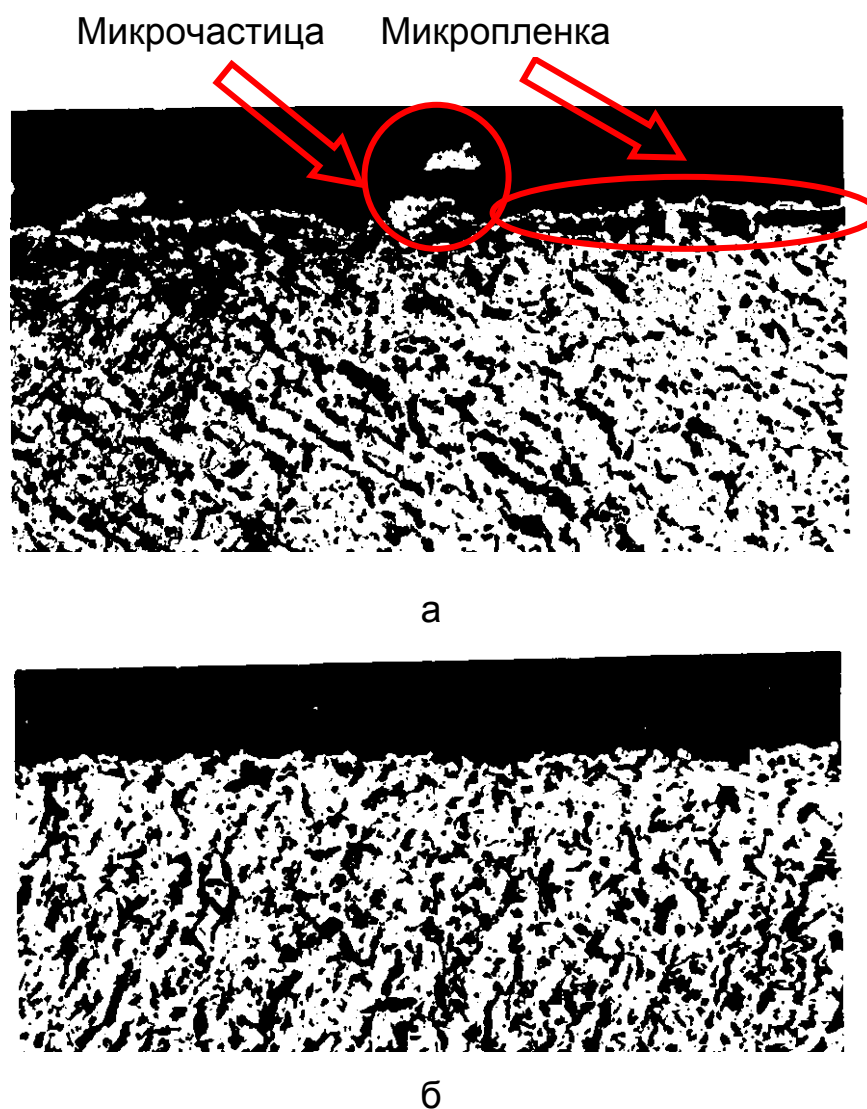


Рисунок 2 – Микрорельеф поверхности образца (класс шероховатости 12): а – до термоимпульсной обработки; б – после термоимпульсной обработки

Изменение шероховатости поверхности деталей происходит как за счет удаления микропластики, максимальный размер которых сопоставим с размером шероховатости, так за счет удаления других микроликвидов – заусенцев и пленок. Кроме того, при действии интенсивного источника тепла в период прохождения ударных волн происходит удаление наиболее выступающей части шероховатости.

Величина удаляемой части шероховатости во всех экспериментах составляла десятые доли микрометра, что не превосходит величины допусков на наружный диаметр резьбы для всех видов деталей трубопроводной арматуры гидравлических систем ЛА. Это обоснованно позволяет считать, что при термоимпульсной финишной очистке и отделке не будет допущено "прослабление" высокоточных резьб деталей трубопроводов высокого давления.

Оптимальное время термоимпульсной обработки поверхностей уп-

лотнительных соединений должно соответствовать времени действия импульсного источника тепла (времени затухания ударных волн). В этом случае происходит оплавление гребешков микронеровностей и их удаление с поверхностей потоками продуктов сгорания. Прекращение действия импульсного источника тепла сопровождается резким снижением интенсивности теплообмена между газом и поверхностями в рабочей камере, что автоматически останавливает процесс обработки.

Регулирование времени интенсивной тепловой обработки возможно как за счет изменения давления и состава топливной смеси, так и за счет применения многоимпульсной обработки. В последнем случае обработка может вестись путем осуществления двух и более последовательных циклов без извлечения деталей из камеры. Такая возможность должна быть предусмотрена при модернизации систем управления существующего термоимпульсного оборудования.

Для количественной оценки герметичности используют скорость утечки - массу или объем среды в единицу времени на единицу длины по периметру герметизирующего соединения. Однако более универсальной характеристикой является массовый расход среды через герметизирующий стык, так как при использовании объема (или количества) среды дополнительно необходимо указывать ее давление и температуру.

Стык герметизирующего соединения является сложной системой как с точки зрения механики контактного взаимодействия шероховатых поверхностей, так и с точки зрения динамики истечения герметизируемой среды. В процессе герметизации в стыке образуется множество пересекающихся микроканалов (капилляров) с сечениями произвольной формы. Основное влияние на герметичность оказывают первичные факторы герметизирующей способности.

К таким факторам относятся [8]: силовые – определяемые усилием или моментом, создаваемые приводом, пружинным устройством и т.п.; конструктивные – геометрия сечения уплотнительного профиля, условно-проходной диаметр, ширина зоны уплотнения; физико-механические свойства поверхностного слоя – предел текучести, модуль упругости, твердость и т.п.; микро- и макрогеометрия профиля - отклонения от правильных геометрических форм, волнистость, шероховатость, субшероховатость; параметры среды.

Термоимпульсная обработка не меняет никакие из перечисленных факторов кроме микрогеометрии профиля шероховатости и в незначительной степени – физико-механических свойств поверхностного слоя, которыми ввиду их незначительности при оценках будем пренебрегать.

Существующие подходы к проектированию уплотнений и определению их герметичности довольно многообразны и чаще всего базируются на различного рода эмпирических подходах. До недавнего времени такой метод оценки свойств герметичности являлся основным. Так, на-

пример, в монографии [9], посвященной технике герметизации разъемных неподвижных соединений, отмечалось, что несмотря на многочисленные усилия в совершенствовании расчетных методов определения герметичности, "... все рассматриваемые модели зоны контакта сопрягаемых поверхностей представляют только научный интерес, так как они позволяют лишь качественно оценить влияние разных факторов на степень герметичности соединений. Для практических целей остается только экспериментальное определение влияния различных факторов на утечку среды".

В основу существующих в отрасли нормативных документов также положены эмпирические зависимости, не связывающие величину утечек с величиной контактных давлений и поэтому не отвечающие требованиям ГОСТ 9544-75 и техническим требованиям на проектирование уплотнительных соединений, где указаны величины допустимых утечек.

К недостаткам эмпирических методов определения контактных давлений герметизации можно отнести следующие [8]: отсутствие количественной связи "контактное давление - утечка"; зависимость от метода контроля герметичности; невозможность учета влияния параметров шероховатости.

Последний недостаток практически исключает возможность использования существующих эмпирических методов для оценки влияния термоимпульсной обработки на характеристики герметичности уплотняющих поверхностей соединительных элементов трубопроводов гидравлических систем. В то же время проведение полномасштабных экспериментальных исследований для исследования данного вопроса является сложной самостоятельной задачей и выходит за рамки настоящей работы.

Поэтому для оценки степени влияния термоимпульсной обработки на характеристики герметичности уплотняющих поверхностей были использованы результаты работы [8], посвященной разработке методов математического моделирования при определении параметров герметичности соединений.

Согласно данным указанной работы герметизирующая способность стыка уплотнительных соединений характеризуется безразмерным коэффициентом сопротивления  $w$ , который зависит от введенных автором функционалов  $F$ ,  $\Pi$ ,  $v_i$  и коэффициента извилистости шероховатой поверхности  $k_f$ . Функционалы  $F$ ,  $\Pi$  и  $v_i$  определяются относительной площадью контакта  $\eta$  и корреляционной функцией  $K(\tau) = R_q^2 \rho(\tau)$ . Параметры аппроксимации нормированной корреляционной функции  $\rho(\tau)$  определяются шаговыми параметрами шероховатости  $S_m$  и  $S$ .

Среднеквадратическое отклонение профиля  $R_q$  можно связать с другими важными параметрами шероховатости: средним арифметиче-

ским отклонением профиля  $R_a$  или наибольшей высотой неровности профиля  $R_{max}$ . Коэффициент извилистости определяется величиной относительной площади контакта  $\eta$  и соотношением шагов продольной и поперечной шероховатости.

Для оценки влияния параметров микрогеометрии на герметичность соединений воспользуемся полученной в [8] зависимостью:

$$\frac{G_l}{\mu} \sim \frac{\left[ 1 - \left( \frac{\eta}{0,5} \right)^{\frac{R_a}{R_p - R_a}} \right]^4 R_p^4 \eta}{(1 - \eta)^2 (1 + 0,338(\eta S_{пр} / S_{поп})^{1,83}) R_q}, \quad (1)$$

где  $\frac{G_l}{\mu}$  – безразмерная характеристика герметичности, представляющая собой отношение погонного массового расхода и динамической вязкости рабочей жидкости;  $R_p$  – высота сглаживания шероховатости профиля (расстояние от линии выступов до средней линии);  $S_{пр}$ ,  $S_{поп}$  – шаги неровностей в продольном и поперечном направлениях соответственно.

Анализ выражения (1) показывает, что герметичность улучшается с уменьшением величин  $R_p$  и отношения  $S_{пр} / S_{поп}$ , а также с увеличением  $\eta$  и отношения  $R_p / R_a$ . Наиболее эффективным функциональным параметром является глубина сглаживания шероховатости  $R_p$  (рис. 3).

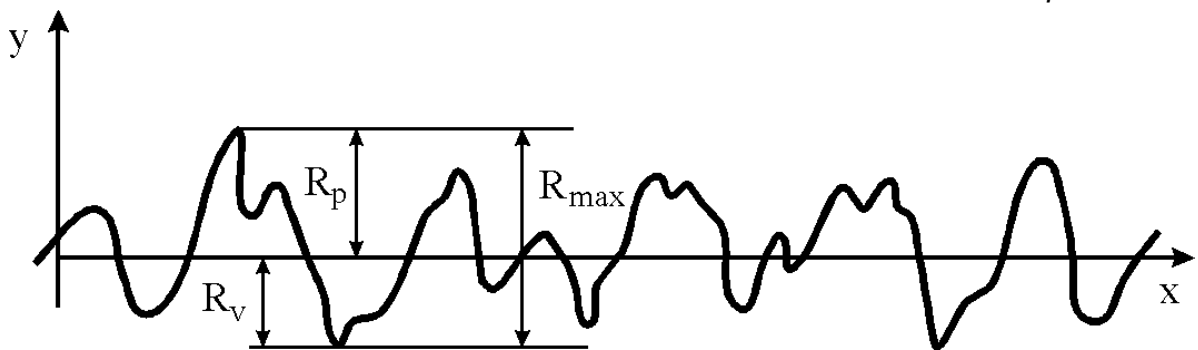


Рисунок 3 – Схема определения параметров шероховатости профиля

При термоимпульсной обработке шаг неровностей не изменяется. Что касается изменения высоты выступов, она происходит неравномерно. Как следует из результатов эксперимента, в наибольшей степени уменьшаются самые выступающие части шероховатости, определяющие величину  $R_p$ . Поэтому величина уменьшения значения  $R_a$ , полученная в экспериментах, может рассматриваться как нижняя оценка для уменьшения величины  $R_p$ .

С учетом этого, пренебрегая увеличением площади контакта, вызванного увеличением опорной поверхности профиля шероховатости в результате термоимпульсной обработки, можем получить оценку для изменения параметра герметичности согласно (3.1):

$$\frac{G_I}{\mu} \text{ после ТИО} / \frac{G_I}{\mu} \text{ нач} \sim (R_a \text{ после ТИО} / R_a \text{ нач})^4. \quad (2)$$

В соответствии с данными проведенных экспериментов по термоимпульсной обработке шероховатых поверхностей с учетом выражения (3.2) при характеристиках шероховатости  $R_a=1,6$  (6 класс шероховатости) увеличение показателя герметичности после термоимпульсной обработки составит не менее 2,0823 раза, а при  $R_a=3,2$  (5 класс шероховатости) – 1,8295 раза.

Полученная оценка сделана при условии сохранения контактного давления. Однако еще одним положительным эффектом термоимпульсной отделки уплотняющих поверхностей может стать уменьшение усилия затяжки соединения, требуемого для обеспечения заданного уровня герметичности.

С учетом сложного характера нагружения трубопроводов, высокого уровня внутреннего давления и вибраций в полете такой результат должен привести к повышению надежности и долговечности неподвижных герметичных соединений трубопроводов гидравлических систем ЛА. Однако для обоснованных оценок степени улучшения этих характеристик требуется проведение дополнительных исследований.

### Выводы

1. С точки зрения герметичности самыми проблемными частями гидравлических систем ЛА являются соединительные элементы трубопроводов. Для трубопроводной арматуры авиационных гидравлических систем требуется не только полная очистка поверхностей от микрочастиц и микрозаусенцев, но и управляемое снижение шероховатости уплотняющих поверхностей.

2. Результаты экспериментальных исследований показали, что при термоимпульсной обработке детонирующими смесями происходит уменьшение шероховатости поверхностей независимо от ее исходного класса. В зависимости от режимов термоимпульсной обработки уменьшение шероховатости таких образцов составило от 16 до 50%.

3. Получено выражение для нижней оценки изменения отношения погонного массового расхода и динамической вязкости рабочей жидкости для герметичного соединения. С учетом экспериментальных данных для трубопроводной арматуры гидравлических систем ЛА увеличение показателя герметичности после термоимпульсной обработки составит не менее 1,8295 раза.



## Список использованных источников

1. Bennett, J.W. Fault tolerant electromechanical actuators for aircraft: PhD Thesis [Text] / John William Bennett. – Newcastle University, School of electrical, electronic and computer engineering, Newcastle. – 2010. – 236 p.
2. Moir I. Aircraft Systems: Mechanical, Electrical and Avionics Subsystems Integration, Third Edition [Text] / Ian Moir, Allan Seabridge. – Chichester: John Wiley & Sons, 2008. – 366 p.
3. Матвиенко, А.М. Проектирование гидравлических систем летательных аппаратов [Текст] / А.М. Матвиенко, И.И.Зверев. – М.: Машиностроение, 1982. – 296 с.
4. Чегодаев, Д.Е. Гидропневмотопливные агрегаты и их надежность [Текст] / Д.Е. Чегодаев, О.П. Мулюкин. – Куйбышев: Кн. изд-во, 1990. – 104 с.
5. Aerospace & Semiconductor Flow Co., Ltd [Электронный ресурс], режим доступа: [asflow.com/images/cust/sanitary\\_62p.pdf](http://asflow.com/images/cust/sanitary_62p.pdf).
6. Лосев, А.В. Повышение эффективности зачистки деталей пневматических и гидротопливных систем при использовании термоимпульсного метода: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 – Х., 1995. – 210 с.
7. Огар, П.М. Контактные характеристики и герметичность неподвижных стыков пневмогидравлических систем двигателей летательных аппаратов / П.М. Огар: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.07.05 – Братск, 1997. – 345 с.
8. Продан, В.Д. Техника герметизации разъемных неподвижных соединений [Текст] / В.Д. Продан. – М.: Машиностроение, 1991. – 160 с.

*Поступила в редакцию 04.10.2012.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.И. Долматов,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*