

УДК 621.45.01:004.945

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГРАДУИРОВКИ ДАТЧИКОВ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ДЛЯ ТЕРМОВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2019 Р.С. Загидуллин^{1,2}, Т.А. Митрошкина¹, М.В. Высоцкая¹

¹Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

²Акционерное общество «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара

Статья поступила в редакцию 22.08.2019

В работе представлены результаты анализа и совершенствования процесса градуировки датчиков тепловых потоков для термовакуумных испытаний космических аппаратов на основе применения анализа видов, причин и последствий потенциальных несоответствий (FMEA) и системы трехмерного проектирования КОМПАС-3D. По результатам проведения FMEA-анализа внедрены корректирующие действия по улучшению процесса градуировки датчиков тепловых потоков и конструкции технологической оснастки. Проведен ряд натурных испытаний и представлены показания термометров сопротивления на термостатирующей пластине до совершенствования процесса градуировки датчиков тепловых потоков и после совершенствования. Направлением дальнейшего использования предполагаемых результатов является разработка рекомендаций и предложений по совершенствованию процессов градуировки датчиков для испытаний ракетно-космической техники на основе современных инженерных методов, таких как анализ измерительных систем (MSA) и развертывание функции качества (QFD), применение систем компьютерного моделирования ANSYS.

Ключевые слова: градуировка, датчики тепловых потоков, FMEA, технологическая оснастка, совершенствование, проектирование.

DOI: 10.24411/1990-5378-2019-00057

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня на международном космическом рынке наблюдается жесткая конкурентная борьба за увеличение объема продаж изделий ракетно-космической техники. Чтобы успешно конкурировать с ведущими мировыми производителями ракетно-космической техники, отечественным предприятиям необходимо вести разработку и производство перспективных высококачественных изделий ракетно-космической техники.

Производство новых высококачественных изделий ракетно-космической техники требует постоянного совершенствования технологических процессов, разработки и внедрения новых методов проектирования, контроля и испытаний, обеспечивающих постоянно растущие требования по качеству. Наиболее эффективным подходом к разработке новых изделий и совершенствования/модернизации уже существующих конструкций и производственных процессов является так называемый робастный подход [1-5], который включает ряд методов управления качеством, такие как развертывание функции качества (QFD), анализ видов, причин и последствий потенциальных несоответствий (FMEA), анализ измерительных систем (MSA) в совокупности с использованием систем трехмерного проектирования (например, КОМПАС-3D) и систем моделирования (например, ANSYS).

1. ПРОЦЕСС ГРАДУИРОВКИ ДАТЧИКОВ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ

Объектом данного исследования является процесс градуировки датчиков тепловых потоков для термовакуумных испытаний космических аппаратов. Датчик теплового потока предназначен для измерения плотности теплового потока, излучаемого поверхностью конструкций космических аппаратов. На предприятии АО «РКЦ «Прогресс» применяют датчики тепловых потоков с конструктивной схемой, приведенной на рисунке 1.

Датчик состоит из чувствительного элемента 3, который представляет собой датчик измерения температуры поверхности конструкций ТЭМ 006-05. Чувствительный элемент 3 зафиксирован к пластине 1 с помощью термостойкого вакуум-плотного клея К-300-61. Пластина 1, в свою очередь, пришита к защитной ткани паке-

Загидуллин Радмир Салимьянович, аспирант кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, инженер-конструктор отдела по разработке конструкции средств выведения. E-mail: Zagidullin_Radmir@mail.ru

Митрошкина Татьяна Анатольевна, аспирант кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.

E-mail: t.mitroshkina@gmail.com

Высоцкая Мария Владимировна, аспирант кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: Manya_93@mail.ru

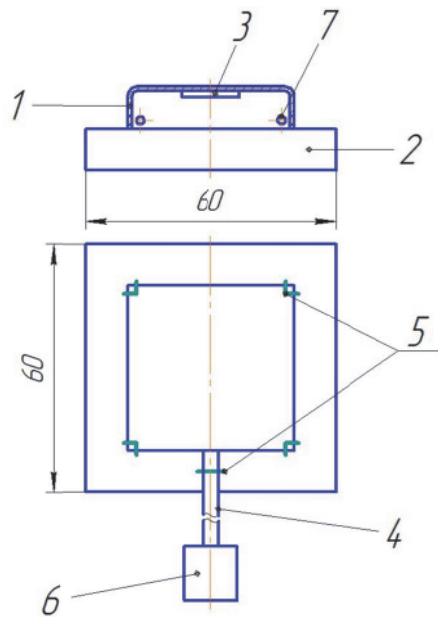


Рис. 1. Датчик теплового потока:
 1 – пластина; 2 – пакет экранно-вакуумной теплоизоляции; 3 – чувствительный элемент; 4 – токовывод; 5 – полиамидная нить; 6 – вилка РС4ТВ с кожухом; 7 – отверстия под полиамидную нить

та экранно-вакуумной теплоизоляции 2 специальной полиамидной нитью 90АТ ТУ 8147-016-05138074-01. Для улучшения метрологических характеристик датчика теплового потока на поверхность пластины 1 с наружной стороны нанесено специальное покрытие с коэффициентом поглощения солнечного излучения $A_s \geq 0,9$ и коэффициентом теплового излучения $\epsilon \geq 0,88$. Чувствительный элемент 3 имеет токовывод 4 с вилкой РС4ТВ 6.

1.1. Процедура проведения градуировки датчиков тепловых потоков

В настоящее время на АО «РКЦ «Прогресс» градуировку датчиков тепловых потоков производят в вакуумной камере путем подачи на них эталонной величины теплового воздействия. Общая схема градуировки датчиков тепловых потоков представлена на рисунке 2.

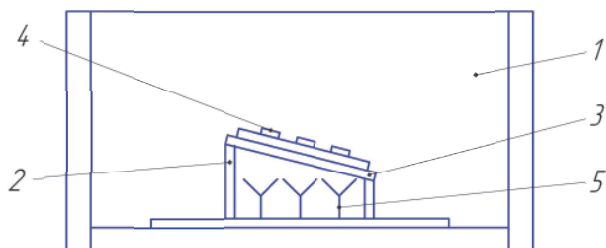


Рис. 2. Общая схема градуировки датчиков тепловых потоков:

- 1 – вакуумная камера; 2 – подставка;
 3 – термостатирующая пластина;
 4 – датчик теплового потока; 5 – тепловой имитатор

Применяется абсолютный метод градуировки: в стационарном тепловом режиме плотность теплового потока поддерживают неизменной во времени и одинаковой на всех плоскостях датчиков [6]. Спецификой является то, что градуировка осуществляется для двух значений показателей температуры. Датчики тепловых потоков располагают на расстоянии не более 2-5 мм от термостатирующей пластины, в то время как, непосредственно на термостатирующей пластине размещены термометры сопротивления для измерения температуры ее поверхности. Производят откачку вакуумной камеры до давления $P_1 \leq 10 \times 10^{-5}$ с охлаждением термостатирующей пластины до температуры $T_{\min} = -180^\circ \dots -181^\circ \text{C}$. Температуру выдерживают 10 минут, затем фиксируют и обрабатывают в специальной программе полученную от датчиков тепловых потоков информацию. После обработки и сохранения информации термостатирующую пластину с помощью теплового имитатора нагревают до температуры $T_{\max} = 180^\circ \dots 181^\circ \text{C}$, выдерживают температуру 10 минут и аналогично описанной процедуре фиксируют и обрабатывают информацию. Полученные и обработанные результаты градуировки заносятся в паспорта датчиков тепловых потоков.

1.2. Функционирование технологической оснастки

Для реализации описанной процедуры градуировки применяется схема функционирования технологической оснастки внутри вакуумной камеры, представленная на рисунке 3. Жидкий азот, который используется для охлаждения термостатирующей пластины, подается в комплект трубопроводов, непосредственно контактирующих с пластиной через металлорукав 1 из штатной линии подачи жидкого азота вакуумной камеры.

Отвод азота из комплекта трубопроводов происходит через металлорукав 2 в линию отвода азота вакуумной камеры. Для нагрева термостатирующей пластины подачу азота прекращают. Нагрев пластины производят, как было описано выше, с помощью тепловых имитаторов. После фиксации и обработки полученной информации от датчиков тепловых потоков, термостатирующую пластину остужают до температуры в пределах $15 \dots 25^\circ \text{C}$ и производят напуск вакуумной камеры до атмосферного давления.

1.3. Конструкция технологической оснастки

Для проведения процесса градуировки датчиков тепловых потоков в АО «РКЦ «Прогресс» применяется технологическая оснастка, представленная на рисунке 4. Оснастка представляет собой термостатирующую пластину 1, зафиксированной на подставке 7 через фторопластовые проставки 5.

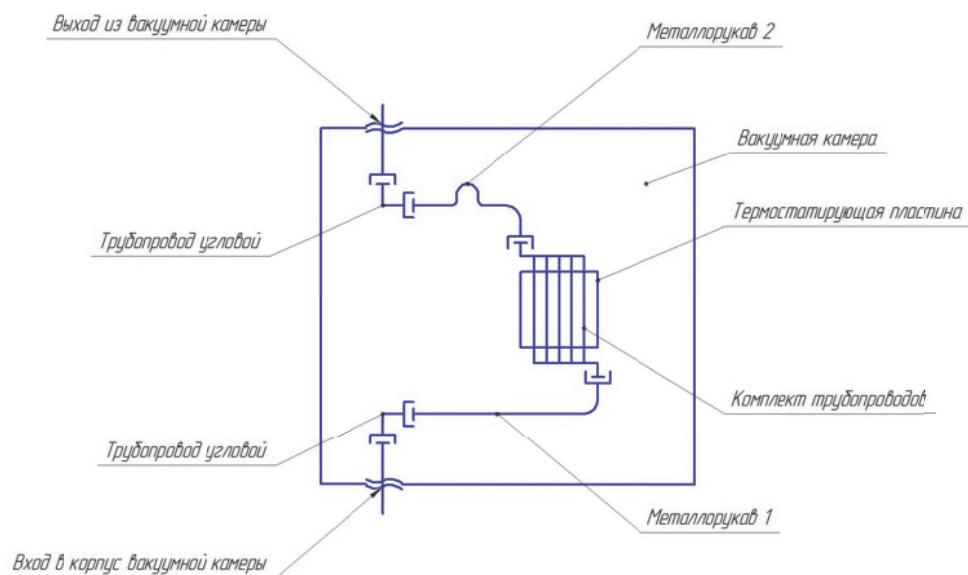


Рис. 3. Схема функционирования технологической оснастки для градуировки датчиков тепловых потоков

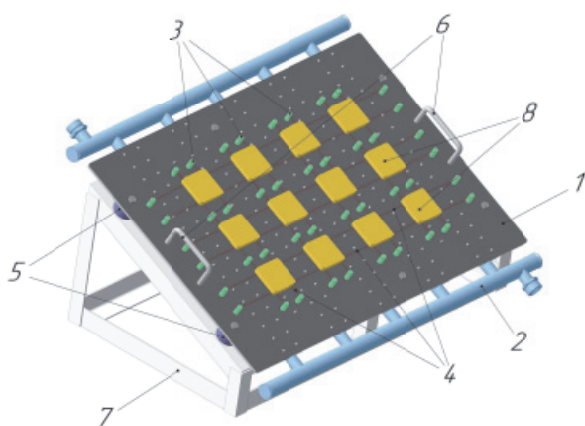


Рис. 4. Технологическая оснастка для тарировки датчиков тепловых:
1 – термостатирующая пластина;
2 – комплект трубопроводов; 3 – бобышка;
4 – проволока; 5 – проставка;
6 – транспортировочные ручки;
7 – подставка; 8 – датчик тепловых потоков

В свою очередь, термостатирующая пластина 1 состоит из листа, изготовленного из магниево-алюминиевого сплава АМг6, и комплекта трубопроводов 2, непосредственно зафиксированного к данному листу с помощью заклепок. Установку датчиков тепловых потоков производят на протянутой через бобышки 3 проволоке 4 из коррозионностойкой жаропрочной стали 12Х18Н9Т. Для переноса и установки термостатирующей пластины 1 предусмотрены транспортировочные ручки 6.

На рисунке 5 представлена термостатирующая пластина с прижимными пластинами. Комплект трубопроводов состоит из профилей 3, двух труб 2 и двух штуцеров 4, предназначенных

для соединения с металлорукавами штатной линии подачи и отвода жидкого азота вакуумной камеры. Составные части комплекта трубопроводов изготовлены из магниево-алюминиевого сплава АМг6 и соединены между собой сваркой.

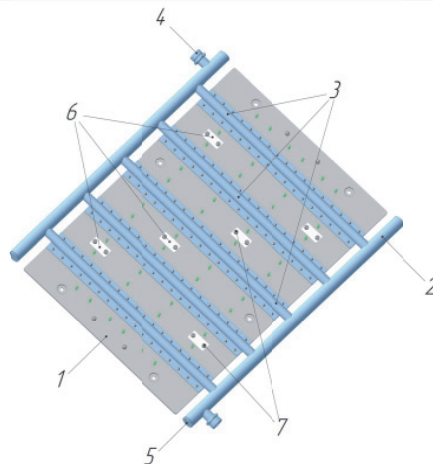


Рис. 5. Термостатирующая пластина с прижимными пластинами:
1 – лист; 2 – труба; 3 – профиль; 4 – штуцер;
5 – заглушка сварная; 6 – прижимная пластина;
7 – болт

Для измерения температуры поверхности термостатирующей пластины 1 предусмотрены термометры сопротивления, зафиксированные с помощью прижимных пластин 6. Прижим термометров сопротивления осуществляется через стеклотенту с помощью болтов 7 прижимных пластин 6. С целью улучшения метрологических характеристик термостатирующей пластины 1 на ее поверхность нанесено специальное покрытие с коэффициентом поглощения солнечного излучения $A_s \geq 0,9$ и коэффициентом теплового излучения $\varepsilon \geq 0,88$.

1.4. Результаты градуировки датчиков тепловых потоков

При проведении процедуры градуировки датчиков тепловых потоков с помощью описанной технологической оснастки при охлаждении термостатирующей пластины до температуры $T_{\min} = -180^{\circ}\dots-181^{\circ}\text{C}$ термометры сопротивления показывают неравномерное охлаждение пластины. Работу проводили две независимые друг от друга группы (по 2 сотрудника) испытателей для исключения возможности нарушения технологического процесса. Термометры сопротивления пронумерованы в соответствии зоной расположения. В таблицах 1-2 представлены результаты измерения при охлаждении термостатирующей пластины до температуры $T_{\min} = -180^{\circ}\dots-181^{\circ}\text{C}$.

Максимальный разброс температуры на термостатирующей пластине при проведении градуировки первой группой испытателей составил $6,3^{\circ}$, при проведении градуировки второй группой испытателей - $6,4^{\circ}$.

Разброс температуры на термостатирующей пластине, обнаруженный в процессе проведения градуировки значительно превышает погрешность средств измерения (термометров сопротивления) и указывает на необходимость совершенствования процесса градуировки датчиков тепловых потоков до получения наименьшего разброса температуры во всех зонах термостатирующей пластины, то есть достижения наибольшей сходимости и воспроизводимости применяемой измерительной системы.

2. ПРИМЕНЕНИЕ FMEA ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГРАДУИРОВКИ ДАТЧИКОВ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ

Анализ видов, причин и последствий потенциальных несоответствий FMEA позволяет путем предвидения и анализа возможных несоответствий / дефектов / отказов на любых этапах жизненного цикла продукции достигать повышения качества конструкции, процесса или системы, предотвращать возможные несоответствия и снижать возможные последствия от них [1, 7]. В результате анализа определяется значение приоритетного числа риска (ПЧР) для всех возможных причин несоответствий. ПЧР определяется как произведение баллов значимости (S), вероятности возникновения (O) и обнаружения (D), установленных экспертами по 10-балльной шкале в соответствии с методикой FMEA. Различают анализ видов и потенциальных несоответствий конструкции (DFMEA), и анализ видов и потенциальных несоответствий технологических процессов (PFMEA).

2.1. Применение PFMEA для анализа и совершенствования технологического процесса градуировки датчиков тепловых потоков

Для выявления и устранения потенциальных причин несоответствий и ошибок в анализируемой измерительной системе проведен анализ процесса градуировки датчиков тепловых по-

Таблица 1. Показания термометров сопротивления на термостатирующей пластине, зафиксированные первой группой испытателей

Показания термометров сопротивления на термостатирующей пластине, °C	Температура на термостатирующей пластине					
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
	-185,1	-180,1	-180,7	-180,5	-186,4	-186,3
Погрешность термометров сопротивления на термостатирующей пластине, °C	0,5...1					

Таблица 2. Показания термометров сопротивления на термостатирующей пластине, зафиксированные второй группой испытателей

Показания термометров сопротивления на термостатирующей пластине, °C	Температура на термостатирующей пластине					
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
	-184,9	-179,5	-180,1	-183,9	-185,9	-185,7
Погрешность термометров сопротивления на термостатирующей пластине, °C	0,5...1					

токов PFMEA, в результате которого определены потенциальные причины несоответствий и предложены действия по предупреждению и снижению рисков. Действия по предупреждению и снижению рисков приводят к снижению баллов возникновения и обнаружения, а также уменьшению значения показателя приоритетного числа риска ПЧР относительно первоначального значения. Протокол PFMEA для процесса градуировки датчиков тепловых потоков представлен в таблице 3.

Использование геометрии 3D моделей в процессе подготовки сборки технологической оснастки в вакуумной камере и проведение анализа DFMEA для повышения качества конструкции технологической оснастки позволяют снизить приоритетное число риска для следующих потенциальных несоответствий:

«Отклонение в сборке оснастки» - с 144 до 60 баллов;

«Температура термостатирующей пластины $T > -180^{\circ}\text{C}$ » - с 320 до 96 баллов.

2.2. Применение DFMEA для анализа и совершенствования конструкции технологической оснастки

В соответствии с рекомендациями, полученными в результате PFMEA процесса градуировки датчиков тепловых потоков, проведен анализ DFMEA для конструкции технологической оснастки, применяемой для реализации процесса градуировки датчиков тепловых потоков. Протокол DFMEA специальной технологической оснастки представлен в таблице 4.

Разработаны предложения: использование расчетов гидро- и газодинамики в трубопроводах, доработка конструкции оснастки, натурные испытания новой конструкции перед эксплуатацией, использование компьютерного моделирования, проведению натурных испытаний на прочность и обнаружение негерметичности методом «щупа».

Реализация предложенных рекомендаций позволит снизить баллы вероятность возникновения и обнаружения и приоритетное число риска ПЧР для несоответствий:

«Неравномерность теплового воздействия термостатирующей пластины на датчики тепловых потоков» - с 504 до 48 баллов;

«Нарушение работоспособности в заданных условиях использования» - с 360 до 30 баллов.

Применение анализа FMEA для процесса градуировки датчиков тепловых потоков предоставляет возможности для повышения качества оснастки и всего процесса проведения градуировки датчиков. Результаты проведения анализа DFMEA в дальнейшем учтены при проектировании усовершенствованной технологической оснастки.

3. РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ОСНАСТКИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ГРАДУИРОВКИ ДАТЧИКОВ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ

По результатам проведения FMEA спроектирована усовершенствованная технологическая оснастка для реализации процесса градуировки датчиков тепловых потоков (рисунок 6).

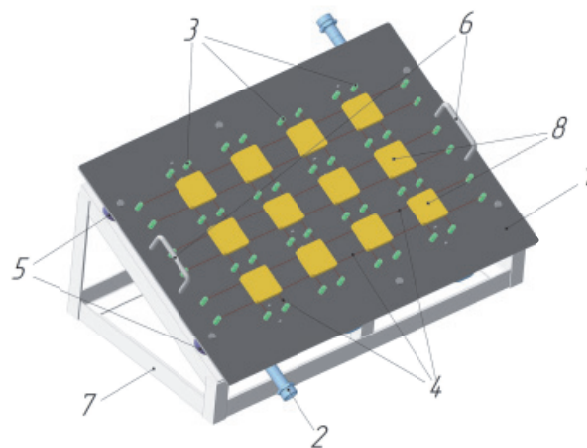


Рис. 6. Усовершенствованная технологическая оснастка

для градуировки датчиков тепловых потоков:

- 1 – термостатирующая пластина; 2 – трубопровод;
- 3 – бобышка; 4 – проволока; 5 – проставка;
- 6 – транспортировочные ручки;
- 7 – подставка; 8 – датчик тепловых потоков

Усовершенствованная технологическая оснастка для градуировки датчиков тепловых потоков содержит измененную конструкцию трубопровода 2.

На рисунке 7 представлена конструкция усовершенствованной термостатирующей пла-

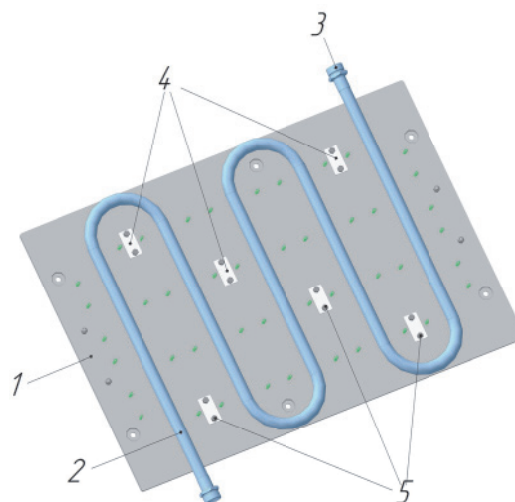


Рис. 7. Термостатирующая пластина с прижимными пластинами:

- 1 – лист; 2 – труба; 3 – штуцер;
- 4 – прижимная пластина; 5 – болт

Таблица 3. Анализ PFMEA процесса градуировки датчиков тепловых потоков (выдержка)

Шаг процесса / Функция	Требования	Вид потенциального несоответствия	Потенциальная причина несоответствия	Значимость (S)	Текущее проектирование			Рекомендуемое действие	Результаты действий									
					Меры по предотвращению	Меры по обнаружению	ПЧР		Предпринятые действия	S	O	D	ПЧР					
1	2	3	4	5	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
1. Подготовка: сборка и осмотр оснастки в вакуумной камере согласно "схеме функционирования".		Отклонение в сборке оснастки	Повреждение или разрушение оснастки в вакуумной камере в процессе градуировки	9	Ошибки при сборке	Наличие схемы, инструкции, дублирующего оператора	4	Организация и контроль процесса сборки оснастки	4	144	Использовать геометрию 3D моделей при проведении подготовки и процессе сборки оснастки	10	3	2	60			
2. Проведение градуировки:			Неправильная градуировка ДТТ, в дальнейшем ошибки испытания космических аппаратов	8	Отсутствие мониторинга давления	Наличие двух датчиков давления, мониторинг давления в рабочей программе оператора	1	Мониторинг на рабочей программе оператора	2	54	Не требуется	-	-	-	-	-	-	-
2.2 Охлаждение термостатирующей пластины путем подачи жидкого азота в трубопроводы оснастки до температуры Ts180°		Температура термостатирующей пластины T>-180°	Неправильная градуировка ДТТ, в дальнейшем ошибки испытания космических аппаратов	8	Конструкция трубопроводов технологической оснастки не позволяет обеспечить равномерное охлаждение термостатирующей	Расчет конструкции	5	Мониторинг, анализ статистики результатов градуировки	8	320	Провести DFMEA анализ технологической оснастки. Разработана усовершенствованная конструкция. Проведен расчет и моделирование конструкции.	8	3	4	96			
2.3 Выдерживать температуру Ts180° в течении 10 минут		Время выдержки меньше 10 минут	Неравномерность температуры, неправильная градуировка	8	Нарушение технологии	Наличие инструкции, дублирующего оператора, фиксация времени в рабочей программе оператора	3	Организация и контроль процесса градуировки, фиксация времени в рабочей программе оператора	2	48	Не требуется	-	-	-	-	-	-	-
2.4 Фиксация и обработка информации на рабочем компьютере оператора		Ошибки при обработке информации	Неправильная градуировка	7	Несоответствующее программное обеспечение	Разработка и внедрение программного обеспечения на заказ	1	Мониторинг, анализ статистики результатов градуировки	2	14	Не требуется	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 4. Анализ DFMEA технологической оснастки для процесса градуировки датчиков тепловых потоков

Издание / функция	Требования	Вид потенциального несоответствия	Последствие потенциального несоответствия	Значимость (S)	Потенциальная причина несоответствия	Текущее проектирование				Рекомендуемое действие	Результаты действий						
						Меры по предотвращению	Внедрение (O)	Меры по обнаружению	Обнаружение (D)		ПЧР	Предпринятые действия	S	O	D	P	
1	2	3	4	5	7	8	9	10	11	12	13	15	16	17	18	19	
Специальная технологическая оснастка для реализации процесса градуировки датчиков тепловых потоков: 1) Требования назначения - оснастка должна обеспечить подачу эталонной величины теплового воздействия на датчики тепловых потоков для реализации процесса градуировки. 2) Требования к составу оснастки - в состав оснастки должны входить: комплект трубопроводов; термостатирующая пластина; подставка под термостатирующую пластину.	Подача разных величин теплового воздействия термостатирующей пластины на датчики тепловых потоков	Исключение одного и более элементов конструкции из состава общей сборки оснастки	Некорректные результаты испытаний	8	Некорректная конструкция технологической оснастки	-	5	Организация и контроль процесса проектирования	9	360	Проанализировать недостатки в работе имеющейся на производстве конструкции оснастки, провести натурные испытания новой конструкции перед эксплуатацией	8	3	1	24		
3) Требования надежности - оснастка должна обеспечить безотказную работу в течение заданного времени и в определенных условиях, соответствующих заданным режимам и условиям использования; работа в вакуумной камере при давлении не более 10×10^{-3} в диапазоне температур от минус 180 до плюса 180, при давлении в трубопроводах подачи и увода азота и трубопроводах термостатирующей пластины 350,2 кгс/см ² .	Негерметичность сварных швов и стыков трубопроводов, недостаточная прочность трубопроводов	Нарушения в работе оснастки	Повреждение или разрушение оснастки и вакуумной камеры	10	Некорректная конструкция технологической оснастки	Расчеты на прочность трубопроводов	5	Организация и контроль процесса проектирования	2	54	Вести контроль и согласование на каждом этапе проектирования	Введены натурные испытания на прочность и на обнаружение негерметичности методом "щупа"	8	2	1	16	
4) Конструктивные требования - масса и габариты оснастки не должны превышать установленных в техническом задании величин, материал оснастки: для термостатирующей пластины - АМг6, для переходников и металлоружав - LZ18H10T.	Превышение массы и габаритов оснастки	Неудобства при проведении процесса градуировки	Неудобства при проведении процесса градуировки	8	Некорректный анализ технического задания	-	2	Организация и контроль процесса проектирования	2	32	Вести контроль и согласование на каждом этапе проектирования	Введен контроль и согласование на каждом этапе проектирования	8	1	1	8	
5) Требования технологичности - изготовление оснастки должно проводиться с использованием прогрессивных технологических процессов с применением унифицированного и типового оборудования, с максимальным заимствованием элементов конструкции.	Недостаточная технологичность конструкции оснастки	Потери на этапах подготовки и производства	Потери на этапах подготовки и производства	7	Не используются современные методы робастного проектирования	-	4	Организация и контроль процесса проектирования	3	84	Применить метод OFD для согласования новой конструкции оснастки и тепловых испытаний	Методика проектирования дополнена применением метода OFD	7	2	2	28	
6) Требования по транспортировке - конструкция оснастки должна включать съемные транспортировочные ручки и технологические заготовки для трубопроводов.	Отсутствие транспортировочных ручек и технологических заготовки для трубопроводов	Неудобства при проведении процесса градуировки	Неудобства при проведении процесса градуировки	4	Некорректный анализ технического задания градуировки	-	4	Организация и контроль процесса проектирования	4	64	Проводить с испытателями совместный анализ процессов подготовки и проведения	На каждом этапе проектирования введено согласование с испытателями	4	2	2	16	
7) Требования эргономики.	Не учтены требования эргономики			3	Некорректный анализ процесса проведения градуировки	-	4	Организация и контроль процесса проектирования	4	48			3	2	2	12	

стины. Основными отличиями от конструкции исходной технологической оснастки, представленной на рис.5, являются отсутствие параллельно расположенных профилей и двух труб, а также и «змеевидное» расположение трубопровода 2. Крепление трубопровода 2 к листу 1 обеспечивается сваркой (шов прерывистый с цепным расположением).

«Змеевидное» расположение трубопровода 2 позволяет получить равномерное охлаждение термостатирующей пластины. Соединение сваркой трубопровода 2 с листом 1 в разы уменьшает трудоемкость работ по сравнению клепанным соединением комплекта трубопроводов с термостатирующей пластиной исходной конструкции.

4. НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ОСНАСТКИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ГРАДУИРОВКИ ДАТЧИКОВ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ

Проведены натурные испытания новой конструкции технологической оснастки при охлаждении термостатирующей пластины до температуры $T_{\min} = -180^{\circ}..-181^{\circ}\text{C}$. Аналогично первоначальному эксперименту работу проводили две независимые друг от друга группы (по 2 сотрудника) испытателей для исключения возможности нарушения технологического процесса. Термометры сопротивления пронумерованы в соответствии зоной расположения. В таблицах 5, 6 представлены результаты измерения дат-

чиками сопротивления при охлаждении термостатирующей пластины до температуры $T_{\min} = -180^{\circ}..-181^{\circ}\text{C}$.

Максимальный разброс температуры на термостатирующей пластине при проведении градуировки первой группой испытателей составил $0,8^{\circ}$, при работе второй группы испытателей – $0,6^{\circ}$. Разброс температуры на термостатирующей пластине с учетом погрешности термометров сопротивления ($0,5^{\circ}...1^{\circ}$) демонстрирует повышение качества измерительной системы, основой которой является усовершенствованная технологическая оснастка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерительная система является основным элементом процесса испытания. Анализ действующего процесса градуировки датчиков тепловых потоков для термовакуумных испытаний космических аппаратов демонстрировал недостаточную приемлемость, разброс значений в несколько раз превышал значение погрешности применяемых термометров. На основе метода FMEA в совокупности с применением системы трехмерного проектирования КОМПАС-3D проведен анализ и совершенствование процесса и технологической оснастки градуировки датчиков тепловых потоков. По результатам FMEA спроектирована усовершенствованная технологическая оснастка для реализации процесса градуировки датчиков тепловых потоков. Натурные испытания продемонстрировали повышение качества измери-

Таблица 5. Показания термометров сопротивления на термостатирующей пластине, зафиксированные первой группой испытателей

Показания термометров сопротивления на термостатирующей пластине, °С	Температура на термостатирующей пластине					
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
	-180,3	-180,1	-180,9	-180,6	-180,4	-180,5
Погрешность термометров сопротивления на термостатирующей пластине, °С	0,5...1					

Таблица 6. Показания термометров сопротивления на термостатирующей пластине, зафиксированные второй группой испытателей

Показания термометров сопротивления на термостатирующей пластине, °С	Температура на термостатирующей пластине					
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
	-180,4	-179,9	-180,5	-180,3	-180,1	-180,2
Погрешность термометров сопротивления на термостатирующей пластине, °С	0,5...1					

тельной системы, полученные разбросы значений близки погрешности средств измерений, то есть минимизирован вклад оснастки и процедуры проведения анализа в изменчивость результатов измерения. В соответствии с подходами робастного проектирования желательнее в дальнейшем регулярно применить комплекс методов управления качеством QFD, MSA, FMEA для своевременного внедрения инноваций и постоянного совершенствования процессов проектирования, изготовления и испытания ракетно-космической техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дмитриев А. Я., Митрошкина Т. А., Васьков Ю. А.* Робастное проектирование и технологическая подготовка производства изделий авиационной техники. Учебное пособие. Самара: СГАУ, 2016. 76 с.
2. *Дмитриев А.Я., Митрошкина Т.А.* Робастные подходы при подготовке производства ПАК из композиционных материалов // Сборник: Управление качеством. Избранные научные труды Шестнадцатой Международной научно-практической конференции. М.: МАИ, 2017. С. 177-181.
3. *Высоцкая М.В., Дмитриев А.Я.* Робастное проектирование: метод совершенствования производственных процессов испытаний изделий на стендах для контроля радиального и торцевого биения тел вращения // Сборник: Эффективные системы менеджмента: качество, инновации, устойчивое развитие. Материалы VI Международного научно-практического форума. [Под редакцией И.И. Антоновой]. 2017. С. 122-126.
4. Улучшение процесса испытаний на герметичность современными методами управления качеством / *М.В. Высоцкая, Д.В. Хрящева, С.И. Орлова, В.Н. Цыман, И.В. Русских, М.А. Шуршев* // Качество и жизнь. 2018. № 3 (19). С. 16-24.
5. *Васьков Ю.А., Дмитриев А.Я., Митрошкина Т.А.* QFD: Разработка продукции и технологических процессов на основе требований и ожиданий потребителей Самара : СГАУ, 2012. 32 с.
6. *Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В.* Основы градиентной теплотрии / Санкт-Петербург, 2012. 215с.
7. *Васьков Ю.А., Дмитриев А. Я., Митрошкина Т. А.* Анализ видов, последствий и причин потенциальных несоответствий (FMEA). Самара : СГАУ, 2008. 31 с.

IMPROVEMENT OF THE CALIBRATION PROCESS OF HEAT FLUX SENSORS FOR SPACE DEVICES' THERMAL-VOLUME TESTS

© 2019 R.S. Zagidullin^{1,2}, T.A. Mitroshkina¹, M.V. Visotskaya¹,

¹Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

²Joint Stock Company Space Rocket Centre Progress, Samara

Presents the results of the analysis and improvement of the calibration process of heat flux sensors for thermal vacuum tests of spacecraft based on the application of Failure mode and effect analysis (FMEA) and the KOMPAS-3D three-dimensional design system. According to the results of the FMEA-analysis, corrective actions were implemented to improve the calibration process of the heat flux sensors and the design of the tooling. A number of field tests were carried out and the readings of resistance thermometers on a thermostating plate were presented before the process of calibration of heat flux sensors was improved and after it was improved. The main direction of further use of the intended results is the development of recommendations and proposals for improving the calibration of sensors for testing rocket and space technology based on modern engineering methods, such as analysis of measuring systems (MSA) and the deployment of quality functions (QFD).

Keywords: calibration, heat flux sensor, FMEA, technological equipment, improvement, design.

DOI: 10.24411/1990-5378-2019-00057

Radmir Zagidullin, Graduate Student at the Department of Aircraft Production and Quality Control in Mechanical Engineering, Design Engineer of the Department for the Development of Launch Vehicles.

E-mail: Zagidullin_Radmir@mail.ru

Tatyana Mitroshkina, Graduate Student at the Department of Aircraft Production and Quality Control in Mechanical Engineering. E-mail: t.mitroshkina@gmail.com

Maria Visotskaya, Graduate Student at the Department of Aircraft Production and Quality Control in Mechanical Engineering. E-mail: Many_93@mail.ru