

Фокин Василий Иванович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ НАЗЕМНЫХ  
СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКЦИЙ ГОЛОВНЫХ  
ОБТЕКАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Специальность 05.07.07 – Контроль и испытание летательных аппаратов и их систем

Специальность 05.02.23 – Стандартизация и управление качеством продукции

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Самара – 2009

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» и в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» (СГАУ).

**Научные руководители:**

Барвинок Виталий Алексеевич – чл.-корр. РАН, доктор технических наук, профессор

Русин Михаил Юрьевич – доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

Коптев Анатолий Никитович - доктор технических наук, профессор;

Лаптев Николай Илларионович - доктор технических наук, профессор.

**Ведущая организация**

ФГУП Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс», г.Самара

**Защита состоится** 13 марта 2009 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д212.215.02 при государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443086, г.Самара, Московское шоссе, 34.

Автореферат разослан 12 февраля 2009 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н. профессор

Д.Л. Скуратов

Актуальность работы. Одним из важнейших элементов конструкции высокоскоростных и высокоманевренных ракет, входящих в состав зенитных комплексов и комплексов авиационного вооружения, являются головные антенные обтекатели, которые в значительной степени определяют аэродинамические характеристики и точность наведения на цель любого летательного аппарата (ЛА). Головные обтекатели защищают антенны самонаведения от силовых и тепловых воздействий набегающего аэродинамического потока, а также от других воздействий характерных для эксплуатации ЛА. Наличие радиолокационных систем наведения в контуре управления ЛА диктует свои требования к обтекателю, который должен быть радиопрозрачным и обеспечивать минимальное искажение электромагнитного поля в заданном спектре рабочих частот. Требование радиопрозрачности определяет номенклатуру используемых в обтекателях материалов: стеклопластики, ситаллы и керамические материалы. Использование неметаллических материалов вносит свою специфику в процессы исследования, проектирования, производства и эксплуатации обтекателей.

Летательным аппаратам свойственно постоянное увеличение скоростей полета и маневренности, следствием чего является рост аэродинамических нагрузок на их агрегаты. Головной обтекатель является одним из самых высоконагруженных элементов ракеты и именно воздействие аэродинамического нагружения предъявляет наибольшие требования к его прочности. Опыт экспериментальных исследований показывает, что более 90 % отказов (разрушений) изделий при наземной отработке происходит в процессе статических испытаний, заключающихся в воспроизведении аэродинамических силовых и тепловых нагрузок на изделие. Качество проведения статических испытаний в значительной мере определяет сроки разработки новых изделий, а также качество производимых обтекателей. К процессу статических испытаний головных обтекателей из неметаллических материалов предъявляются высокие требования. Они характеризуются большими значениями воздействующих на изделие факторов: высокие скорости нагрева, большие значения тепловых потоков, высокие значения силовых нагрузок.

Совершенствование методов и средств статических испытаний в условиях постоянного роста требований к авиационной и ракетной технике, безусловно, является актуальной задачей.

Среди проблем статических испытаний обтекателей ракет можно выделить: повышение точности воспроизведения режимов испытаний, уменьшение погрешности измерения температуры изделия, внедрение новых методов контроля прочностных свойств конструкции обтекателя.

Анализ возможностей современных цифровых технологий показывает, что они не в полной мере используются для обеспечения повышения качества процесса статических испытаний. Существующее программно-аппаратное обеспечение позволяет не только увеличить точность результатов испытаний, но и разработать новые неразрушающие методы контроля конструкции обтекателя.

Цель работы. Повышение точности результатов испытаний, сокращение сроков и материальных затрат при наземной отработке конструкции головных обтекателей летательных аппаратов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать метод и средства контроля прочности по всей окружности обтекателя, позволяющие исключить случайный выбор направления нагружения за счет определения «слабого» направления для данного изделия.
2. Разработать метод и средства контроля сдвиговых свойств клеевого соединения конструкции керамических обтекателей, обеспечивающие контроль операции сборки без разрушения конструкции.
3. Повысить точность воспроизведения тепловых нагрузок при испытании керамических обтекателей за счет разработки алгоритмов программного обеспечения для системы управления испытаниями.
4. На основе разработанных методов определить новые показатели качества, характеризующие прочностные параметры конструкции керамических обтекателей.
5. Внедрить разработанные методы в процессы производства и испытаний обтекателей летательных аппаратов.

6. Разработать и внедрить процедуру анализа потенциальных несоответствий (дефектов) FMEA для процесса клеевого соединения.

7. Адаптировать индексы воспроизводимости серии  $C_{pk}$  для контроля качества керамических обтекателей.

#### Автор выносит на защиту

1. Способ двухкоординатного задания поперечной силовой нагрузки, защищенный патентом на изобретение №2249196.

2. Систему контроля сдвиговых свойств клеевого соединения, обеспечивающую контроль качества сборки керамических обтекателей.

3. Номенклатуру показателей качества керамических обтекателей, характеризующих прочностные свойства конструкции обтекателей.

4. Алгоритмы программного обеспечения, обеспечивающие повышение точности управления режимами инфракрасного нагрева керамических изделий.

Научная новизна диссертации заключается в разработке и внедрении новых методов статических испытаний, обеспечивающих повышение качества испытательного процесса и контроль качества производимых обтекателей.

Автором впервые получены следующие результаты:

1. Впервые разработан и внедрен метод двухкоординатного задания поперечной силовой нагрузки, позволяющий контролировать прочность конструкции на воздействие изгибающего момента по всей окружности изделия.

2. Определены показатели качества, характеризующие прочностные параметры конструкции керамических обтекателей.

3. Разработаны алгоритмы программного обеспечения автоматизированной системы управления испытаниями, повышающие точность результатов статических испытаний.

4. Разработана и внедрена электропневматическая следящая система управления силовым нагружением в процессе статических испытаний изделий.

5. Разработана автоматизированная система контроля сдвиговых свойств клеевого соединения керамических обтекателей.

#### Практическая ценность

1. Разработана методика статических испытаний, исключая случайный выбор направления нагружения за счет определения «слабого» направления для данного изделия.

2. Разработанная электропневматическая следящая система управления силовым нагружением обеспечила автоматическое регулирование давления в системе контроля сдвиговых свойств клеевого соединения, а также управление сосредоточенной нагрузкой в процессе повторно-статических испытаний с высокой точностью (максимальное отклонение регулируемого параметра не превышает 5 %).

3. Разработанные алгоритмы программного обеспечения внедрены в автоматизированную систему управления испытаниями, что позволило повысить точность управления режимами испытаний (максимальное отклонение регулируемого параметра не превышает 3 %), а также значительно сократить время подготовки к испытаниям (в два раза).

4. Разработанные средства измерения перемещений обеспечивают контроль напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции в процессе статических испытаний, а также определение установленных показателей качества производимых обтекателей с погрешностью не более 3 %.

5. Разработанные показатели напрямую характеризуют НДС элементов конструкции при эксплуатационных воздействиях, что повышает точность контрольной операции и позволяет выявлять не только недостатки клеевого соединения, но и другие виды возможных дефектов.

6. Разработан и внедрен стандарт организации «Наземные испытания изделий из конструкционных керамических и стеклопластиковых материалов для ракетно-космической и авиационной отрасли».

### Реализация результатов работы

1. Разработанные методы и средства испытаний внедрены в установке ОТА500 и используются для испытаний обтекателей ракет класса «воздух-воздух».

2. Разработанные алгоритмы программного обеспечения системы управления испытаний внедрены в автоматизированном испытательном комплексе, который используется для статических испытаний обтекателей ракет всех типов.

### Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на международных и Всероссийских конференциях: Обнинск, 2004, 2007, АР Крым, 2006.

По результатам исследований получено 2 патента на изобретение, опубликовано 9 статей в журналах рекомендованных ВАК.

### Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, общих выводов, списка использованных источников, в совокупности изложенных на 145 страницах машинописного текста, 75 рисунков, 9 таблиц.

### Краткое содержание работы

Во введении изложена актуальность работы, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе рассмотрены особенности эксплуатации головных обтекателей высокоскоростных и высокоманевренных ракет. Условия работы головных обтекателей справедливо считают экстремальными, так как в полете они подвергаются интенсивному нагреву и высоким перегрузкам. Для некоторых ракет температура на фронтальной поверхности обтекателя может составлять более 2000 К, а силовые нагрузки – достигать  $10^5$  Н (таблица 1).

Таблица 1 – Эксплуатационные воздействия и радиотехнические требования к антенным обтекателям ЛА

Класс ЛА	Тепловой поток, МВт/м <sup>2</sup>	Аэродинамический напор, МПа	Скорость нагрева, К/с	Максимальная температура поверхности, К	Время автономного полёта, с	Радиопрозрачность, %
В – В	0,210	0,5	100	1300	40...60	85
ЗУР	2.100	2.5	200	1600	50...70	80
П – В	4.200	5.0	400	>3300	40...60	85
В – П	1.300	1.5	100	1300...1800	300...400	80
БСРД	21...42	5.0	500	>3300	10...20	70
МБР	210	>10.0	700	>3300	10...30	70

Комплексная задача создания нового обтекателя включает разработку узла соединения неметаллической оболочки со вторым отсеком, выполненным из металла. Здесь ограничено применение механических соединений – фланцевых, сварных, болтовых и т.д. Наибольшее распространение получил способ соединения керамической оболочки со шпангоутом упругими клеями. Клеевое соединение в этом случае несет не только соединительные функции, но и функции важного конструктивного элемента, распределяющего напряжения в местах возможных их концентраторов.

Опыт экспериментальных исследований показывает, что зона соединения является наиболее «слабым», с точки зрения прочности, узлом конструкции (рисунок 1).

В более чем 95 % случаев «очаг» разрушения керамической оболочки в процессе статических испытаний находится именно в этой зоне (рисунок 2).

Статические испытания являются важнейшим этапом наземной отработки, в процессе которого определяется прочность на воздействие аэродинамического нагружения. Эти испытания завершают цикл наземных испытаний изделия. Решению проблем наземных статических испытаний посвящено большое количество работ специалистов ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, НПО «Энергия», НПО «Машиностроение», МГТУ им. Н.Э. Баумана, СГАУ им. С.П. Королева и др. Особо можно выделить работы Синярева Г.Б., Баранова А.Н., Полежаева Ю.В., Барвинка В.А., Резника С.В., Русина М.Ю., Райляна В.С. и др.

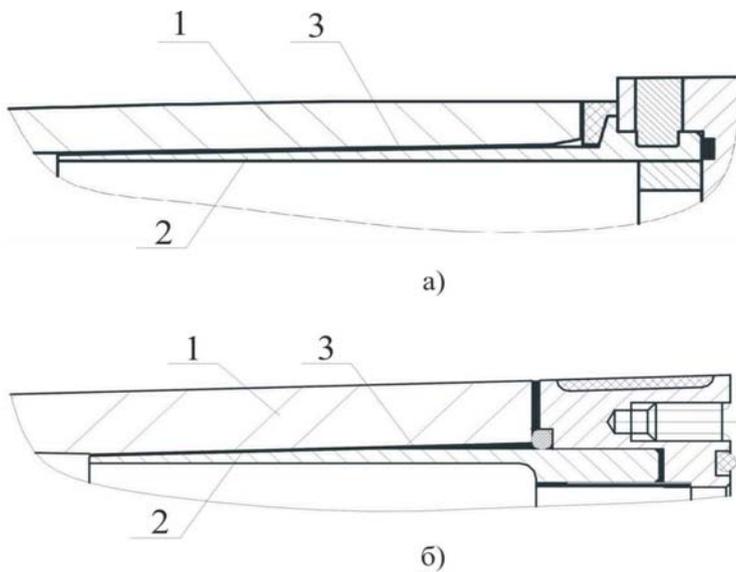


Рисунок 1 – Варианты конструкций керамических обтекателей: 1 – керамическая оболочка, 2 – металлический шпангоут, 3 – клеевое соединение

тепловых потоков) часто не дает возможности использования традиционных методов контроля напряженно-деформированного состояния. Это снижает вероятность определения причины отказа изделия в процессе испытания. Вследствие этого большое внимание необходимо уделять разработке дополнительных методов исследований и испытаний, повышающих информативность испытаний. К ним следует отнести методы исследования конструкции обтекателей, в частности, методы исследования механических свойств клеевого соединения конструкции натуральных обтекателей.

Указано, что методы статических испытаний конструкции обтекателя могут быть использованы для контроля показателей качества конструкции керамических обтекателей. В условиях повышающихся требований к ракетной технике существующего контроля качества конструкции не достаточно. В настоящее время реальные показатели прочности конструкции определяются в процессе статических испытаний (разрушающими методами) только на нескольких изделиях из поставляемой партии. С помощью методов статических испытаний можно осуществить контроль конструкции путем воздействия неразрушающими уровнями нагрузок и снятием отклика объекта в виде параметров НДС конструкции.

Во второй главе разработан метод контроля прочности по всей окружности обтекателя, позволяющего исключить случайный выбор направления нагружения за счет определения «слабого» направления для данного изделия.

Показано, что основной проблемой статических испытаний, является низкая точность результатов (достоверность) испытаний. Она определяется наличием случайного выбора направления поперечного силового нагружения в процессе статических испытаний. Кроме этого, серьезной проблемой является низкая точность задания температурных полей на поверхности керамических материалов, связанная с высокой погрешностью измерения температуры наружной поверхности при внешнем нестационарном инфракрасном нагреве.

Специфика статических испытаний (высокие значения температур, большие плотности

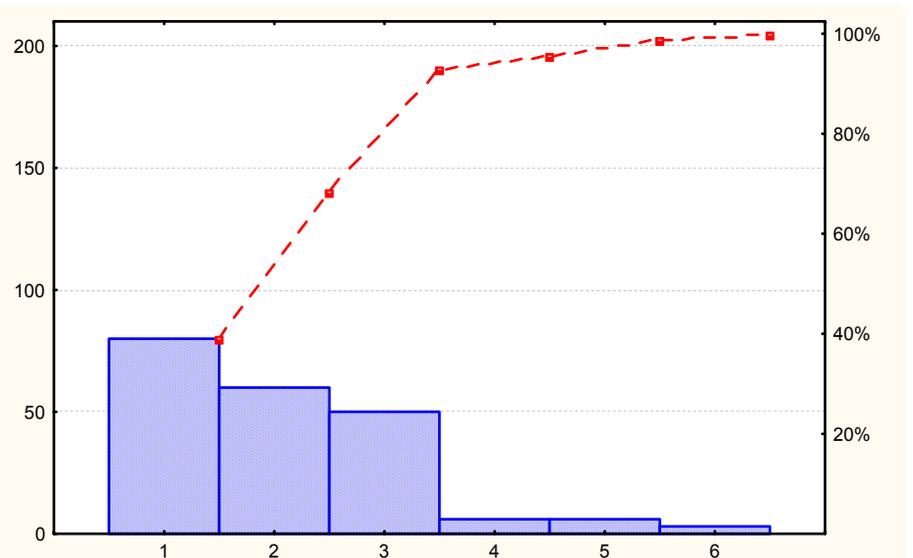


Рисунок 2 – Диаграмма Парето отказов обтекателей в процессе статических испытаний: 1, 2, 3 – образование и развитие трещины в оболочке в зоне узла соединения соответственно в зонах сжатия, растяжения, других зонах; 4 – образование и развитие трещины в оболочке вне зоны узла соединения; 5 – разрыв клеевого соединения; 6 – прочие отказы

Исключение случайного выбора направления нагружения осуществляется по следующей схеме:

- силовое нагружение неразрушающими уровнями нагрузок по всей окружности изделия с одновременным контролем НДС конструкции;
- выявление «слабого» направления, как направления нагружения, при котором достигаются максимальные напряжения в керамической оболочке;
- статические испытания с нагружением по выявленному «слабому» направлению.

Для нагружения изделия по всей окружности был разработан способ двухкоординатного задания поперечной нагрузки. В основе способа лежит разложение вектора поперечной силы  $F$ , действующей на оболочку, на взаимоперпендикулярные векторы сил, лежащие в плоскости, перпендикулярной оси вращения оболочки (рисунок 3).

Использование двухкоординатной системы нагружения позволяет произвести любой маневр, который выполняет ракета в процессе полета. На основе данного способа была разработана система сканирования силовой нагрузки, обеспечивающая вращение вектора силовой нагрузки с одновременным контролем напряженно деформированного состояния конструкции.

Воспроизведение режима заключается в вычислении проекций по формулам (1) и выдаче пропорциональных этим величинам сигналов на исполнительные органы.

$F_1 = F \sin(\omega t + \pi/2)$ ;  $F_2 = F \sin \omega t$ ;  $F_3 = F \sin(\omega t - \pi/2)$ ;  $F_4 = F \sin(\omega t - \pi)$ , (1)  
 где  $F$  – поперечная сила;  $\omega$  – частота вращения нагрузки;  $F_i$  – взаимоперпендикулярные векторы.

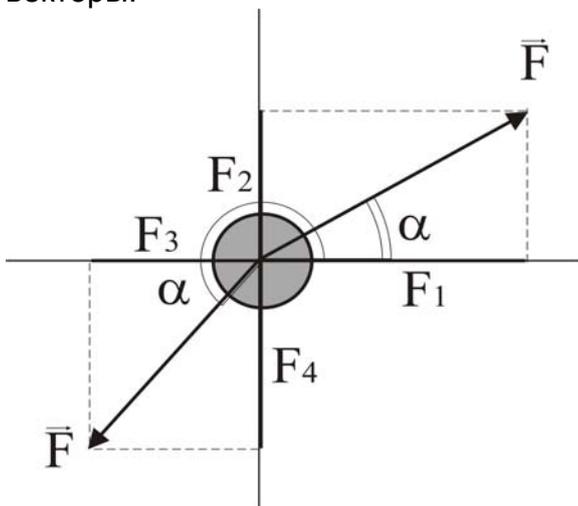


Рисунок 3 – Диаграмма двухкоординатного задания нагрузки

Контроль НДС конструкции обтекателя осуществляется с помощью наклеиваемых на керамическую оболочку в зоне соединения тензорезисторов, обеспечивающих определение деформаций. На основе этих данных определяется поле напряжений оболочки в клеевой зоне соединения. «Слабое» направление обтекателя определяется, как направление нагружения, при котором достигаются максимальные напряжения в керамической оболочке.

Результаты экспериментальных исследований НДС при нагружении по всей окружности изделий РПО-50, 48Н6, 1801-2А показывают, что неравномерность (отклонение от среднего значения) напряжений в зависимости от направления составляет 5 – 15 % (таблица 2).

Таблица 2 – Распределение максимальных напряжений при нагружении 50% от эксплуатационных нагрузок по всей окружности изделий РПО-50, 48Н6, 1801-2А

Угол (направление) нагружения, рад	0	0,7	1,4	2,1	2,8	3,5	4,2	5,9
Напряжения в изделии РПО-50, МПа	4,5	4,1	3,9	3,5	4,0	4,1	4,0	4,2
Напряжения в изделии 48Н6, МПа	6,0	6,4	6,3	6,7	7,1	6,9	6,5	6,3
Напряжения в изделии 1801-2А, МПа	5,0	5,2	5,3	5,7	5,6	5,5	5,2	4,8

Анализ показывает, что величина неравномерности для некоторых изделий (изделий с жестким шпангоутом, для которых зависимость напряжений оболочки от нагрузки является линейной) равна той максимальной погрешности определения прочности, которую могли иметь статические испытания при случайном выборе направления поперечного нагружения. Установлено, что напряженно-деформированное состояние оболочки при контроле прочности по всей окружности изделия может быть охарактеризовано следующими параметрами (таблица 3).

Таблица 3 – Количественные показатели качества конструкции

Обозначение	Описание
$\sigma_{cp}$	Среднее значение максимальных напряжений в «опасном» сечении обтекателя. Под «опасным» сечением понимается окружное сечение, в котором возникают максимальные напряжения оболочки
$\sigma_{max}$	Величина максимальных напряжений в оболочке в «опасном» сечении
$\alpha_0$	«Слабое» направление конструкции

Кроме того, разработан метод контроля сдвиговых свойств клеевого соединения конструкции керамических обтекателей. Формула зависимости тангенса угла наклона оболочки, учитывая допущения о том, что клей находится в состоянии упругого деформирования ( $E_{kl} \approx 3G_{kl}$ ), имеет вид:

$$tg\theta = \frac{\delta_{kl}}{G_{kl}} \frac{M + Q \frac{L_{kl}}{2}}{A}, \quad (2)$$

где  $A$  – коэффициент зависящий от геометрических параметров обтекателя;  $\theta$  – угол поворота оси оболочки;  $\delta_{kl}$  – толщина клеевого соединения;  $G_{kl}$  – модуль сдвига;  $M$  – изгибающий момент;  $Q$  – осевая нагрузка;  $L_{kl}$  – длина клеевого соединения.

Данное выражение показывает, что при постоянных геометрических параметрах конструкции ( $L_{kl} = \text{const}$ ) и постоянных значениях нагрузки, перемещение носка и, следовательно, величина максимального напряжения определяется отношением  $\frac{\delta_{kl}}{G_{kl}}$ .

Указанное отношение можно определить на натурном обтекателе, испытывая на сдвиг клеевое соединение путем создания во внутренней полости обтекателя избыточного давления и измеряя перемещения сдвига клея. В этом случае среднее значение данного отношения равно:

$$\left( \frac{\delta_{kl}}{G_{kl}} \right)_{\bar{n}\delta} = l_{\bar{n}\delta} \frac{2\pi R L_{kl}}{PS}, \quad (3)$$

где  $P$  – величина избыточного давления;  $S$  – площадь сечения;  $l_{cp}$  – осевое перемещение.

Измеряя перемещение сдвига клеевого соединения в разных точках, мы получаем распределение перемещений сдвига по окружности изделия. Место с максимальными перемещениями будет указывать на «слабое» направление соединения, при нагружении по которому при постоянных геометрических параметрах конструкции и отсутствии дефектов конструкции в оболочке будут возникать максимальные напряжения. Метод контроля сдвиговых свойств клеевого соединения позволяет выявить взаимосвязь между общим напряженно-деформированным состоянием конструкции и механическими свойствами клеевого соединения. Тем самым обеспечивается выявление «слабых» мест конструкции на ранних этапах наземной отработки и достигается ускорение процесса разработки.

Для реализации метода была разработана электропневматическая следящая система управления давлением с питанием от внутризаводской сети сжатого воздуха. Система реализована на базе дискретного электромагнитного преобразователя (ЭПП). В основе работы системы лежит использование широтно-импульсного модулятора в качестве регулирующего органа. Разработана система измерения перемещений сдвига клеевого соединения. Измерение перемещений клеевого соединения керамической оболочки осуществляется путем регистрации величины зазора между торцом оболочки и буртом металлического шпангоута.

С помощью разработанных систем были проведены экспериментальные исследования сдвиговых свойств клеевых соединений конструкций натуральных изделий РПО-50, 48Н6, 1801-2А. Погрешность измерения перемещений сдвига определяется по сходимости показаний с синусоидальной аппроксимирующей кривой и составляет 5 %

(рисунок 4). Разработанная система может быть использована для контроля качества операции сборки обтекателя (таблица 4).

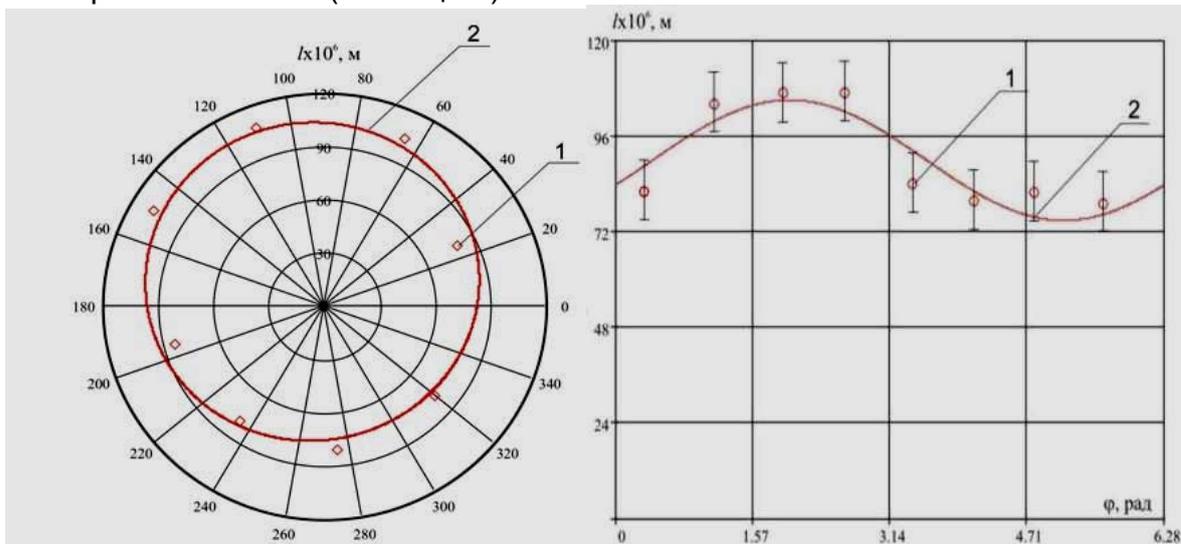


Рисунок 4 – Распределение перемещений сдвига клеевого соединения по окружности изделия 1801-2А: 1 – экспериментально полученные данные, 2 - синусоидальная аппроксимирующая кривая

Таблица 4 – Количественные показатели качества соединения

Обозначение	Описание
$l_{cp}$	Среднее осевое перемещение оболочки относительно шпангоута
$\gamma$	Угол наклона плоскости торца оболочки. Данный параметр характеризует равномерность распределения сдвиговых свойств клея по окружности изделия
$\varphi_0$	Направление положения точки торца с максимальным перемещением в осевом направлении. Данный параметр показывает направление «слабого» места соединения

В качестве оценки изменения количественных показателей клеевого соединения предложена модификация индекса воспроизводимости  $C_{pk}$ .

$$C_{pk} = \frac{ВГД - ПК}{3\sigma}, \quad (4)$$

где ВГД – граница допуска (для осевого перемещения или для угла наклона); ПК – максимальное осевое перемещение или угол наклона плоскости торца;  $\sigma$  – дисперсия.

Минимальное требование по уровню  $C_{pk}$  установлено равное 2, так как при этом гарантированно обеспечиваются требования по прочности. Результаты расчетов показателей представлены по трем изделиям для десяти единиц (рисунок 5).

В качестве методов регулирования процесса клеевого соединения, совместно с руководством предприятия, был предложен механизм оценки потенциальных несоответствий (дефектов), который основан на FMEA-анализе (таблица 5). В случаях, когда показатель «приоритетное число риска (ПЧР)» превысил пороговое значение

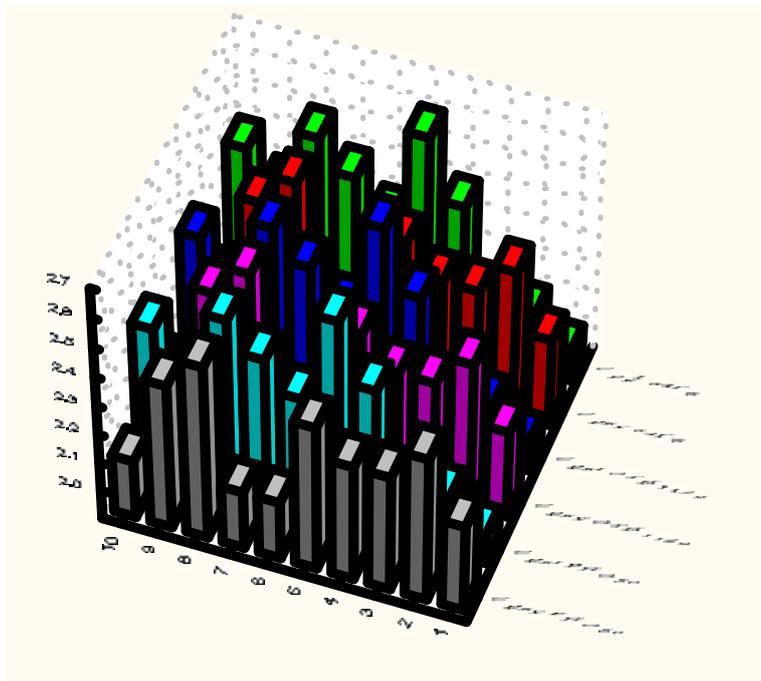


Рисунок 5 – Результаты оценки количественных показателей качества клеевого соединения

равное 100, разработаны рекомендации по снижению вероятности появления несоответствий (дефектов).

Таблица 5 – Фрагмент результатов FMEA-анализа

Вид потенциального несоответствия	Последствия потенциального несоответствия	S	Потенциальная причина	O	Действующие меры контроля	D	ПЧР	Рекомендуемые действия
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 Неверная дозировка компонентов	Неприклеен	7	Низкая квалификация персонала	4	-	3	120	Применение дозаторов
	Пониженная прочность	10						
	Длительное время вулканизации	4						
	Неудовлетворительные сдвиговые свойства	10						
2 Низкое качество перемешивания	Неприклеен	7	Превышение срока годности компонентов	4	-	2	80	-
	Пониженная прочность	10						
	Длительное время вулканизации	4						
	Неудовлетворительные сдвиговые свойства	10						
3 Неудовлетворительная подготовка поверхности	Неприклеен	7	Низкая квалификация персонала	2	Входной контроль	2	40	-
	Пониженная прочность	10						
	Длительное время вулканизации	4						
	Неудовлетворительные сдвиговые свойства	10						
4 Неудовлетворительное качество нанесения подслоя	Неприклеен	7	Низкая квалификация персонала	2	-	2	40	-
	Пониженная прочность	10						
	Длительное время вулканизации	4						
	Неудовлетворительные сдвиговые свойства	10						
5 Несоответствующая толщина слоя	Неприклеен	7	Несоответствие геометрических размеров составных элементов	6	-	4	240	Внедрение контроля геометрических размеров
	Пониженная прочность	10						
	Длительное время вулканизации	4						
	Неудовлетворительные сдвиговые свойства	10						
6 Неудовлетворительная температура вулканизации	Неприклеен	7	Низкая температура в цехе	1	Периодический мониторинг условий производства	1	10	-
	Пониженная прочность	10						
	Длительное время вулканизации	4						
	Неудовлетворительные сдвиговые свойства	10						
7 Недостаточная выдержка до полной вулканизации	Пониженная прочность	10	Отсутствие процедуры идентификации	4	Операционный контроль	1	40	Разработка процедуры контроля, позволяющая идентифицировать время выдержки
	Длительное время вулканизации	4						
	Неудовлетворительные сдвиговые свойства	10						

Для повышения точности результатов статических испытаний разработана система управления нагревом. Для уменьшения времени подготовки к испытаниям и увеличения точности управления режимами была разработана подсистема адаптации системы к объекту управления. Подсистема адаптации обеспечивает идентификацию объекта управления воздействием на него калиброванными сигналами и снятием реакции объекта. Схема идентификации объекта реализуется размыканием контура обратной связи системы управления испытаниями. Таким образом, определяются характеристики объекта: частотные, переходные, статические. Используя полученные характеристики объекта управления, определяются параметры ПИД-регулятора: коэффициенты, необходимая частота дискретизации, введение нелинейных элементов. Коэффициенты ПИД-регулятора с передаточной функцией:

$$R(s) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right); \quad (5)$$

определяются как:

$$k_p = \frac{M}{\sqrt{M^2 - 1}} \frac{1}{A_o(\omega_{рез})}; T_i = -\frac{2}{\omega_{рез}^2 \varphi_o(\omega_{рез})}; T_d = \frac{1}{T_i \omega_{рез}^2}; \quad (6)$$

где  $k_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  – коэффициент передачи, постоянные времени интегрирования и дифференцирования соответственно,  $M$  – требуемое предельное значение частотного показателя колебательности – резонансного пика АЧХ замкнутого контура,  $\omega_{рез}$  – резонансная частота,  $A_o(\omega)$  – АЧХ объекта,  $\varphi_o(\omega)$  – ФЧХ объекта.

Выбор необходимой частоты дискретизации регулятора производится исходя из условия:  $\omega_s \geq 10\omega_{рез}$ . На основе полученных статических характеристик объекта управления делается вывод о необходимости компенсации нелинейностей объекта управления. В этом случае на помощь приходят преимущества цифровых систем управления, позволяющих легко программировать алгоритмы регулятора, с целью введения различных нелинейных элементов для улучшения качества регулирования режимом испытания. Для компенсации зоны нечувствительности объекта управления в алгоритм регулятора вводится поправочный коэффициент  $k_n$ :

$$R(s) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) + k_n, \quad (7)$$

где  $k_n$  – зона нечувствительности объекта управления.

Определенные при адаптации настройки регулятора сохраняются в файле конфигурации конкретного типа испытания и, таким образом, значительно сокращают подготовку к испытанию данного изделия.

В третьей главе разработаны средства для статических испытаний. Для целей проведения статических испытаний обтекателей ракет был разработан plug-in (программное обеспечение (ПО) статических испытаний), обеспечивающий кроме основных функций ПО «Recorder» функции отображения информации различными способами, создания, настройки и сохранения конфигурации конкретного вида испытаний, настройки алгоритмов цифрового регулятора, настройки системы обучения и резервирования (рисунок 6).

Для исследования НДС керамических обтекателей разработаны датчики перемещения носка и радиального перемещения оболочки. Датчики располагаются во внутренней полости обтекателя (рисунок 7), что позволяет: исключить воздействие больших величин тепловых потоков, исключить искажение теплового потока, падающего на конструкцию; измерять относительное перемещение носка.

Для контроля качества клеевого соединения разработано устройство, принцип действия которого заключается в том, что чувствительные элементы монтируются на двух съемных жестких ободах, закрепляемых по разные стороны клеевого соединения. Надежность крепления ободов обеспечивается усилием обжатия, создаваемого пружинным или болтовым соединением (рисунок 8).

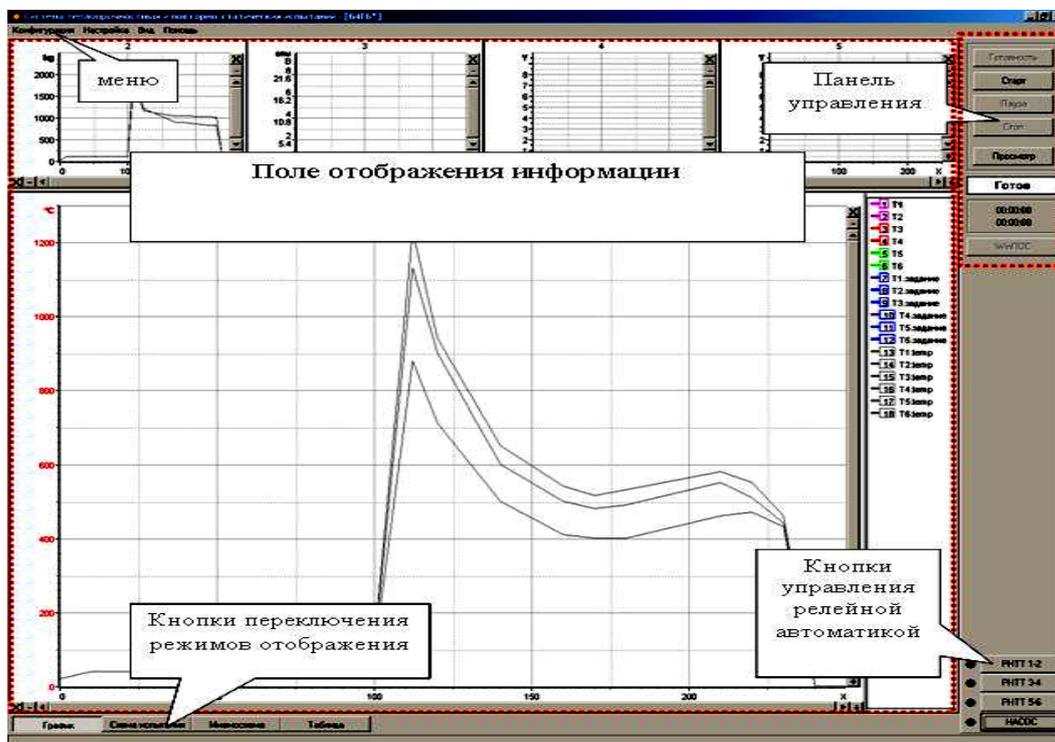


Рисунок 6 – Главное окно ПО статических испытаний

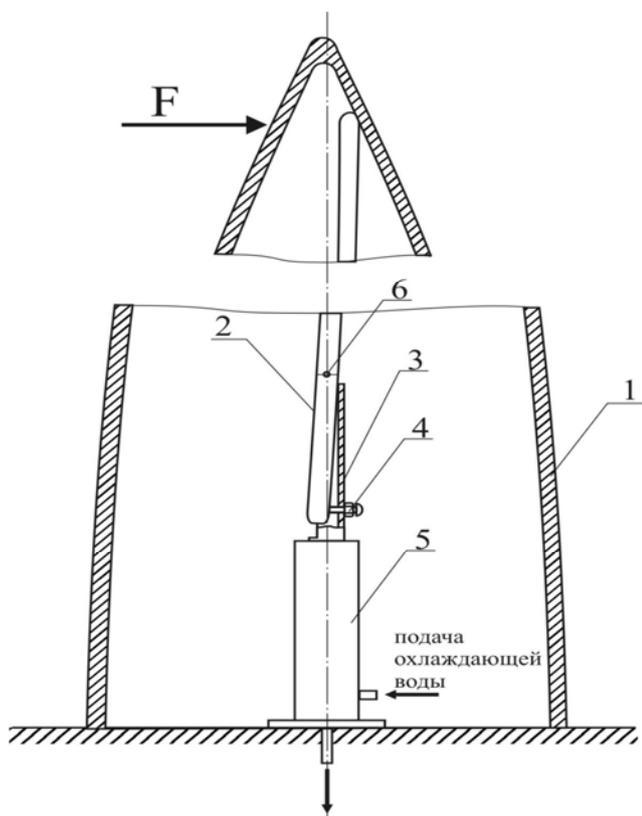


Рисунок 7 – Схема датчика отклонения носка:  
1 - испытуемое изделие, 2 - штанга датчика, 3 - чувствительный элемент, 4 - регулировочный винт с контргайкой, 5 - теплоизоляция ТЗМК-10, 6 - ось вращения штанги

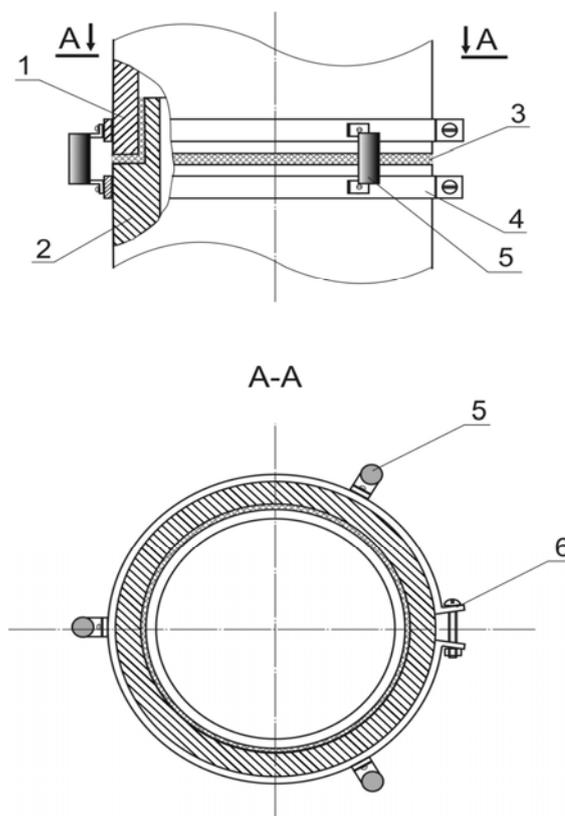


Рисунок 8 – Схема устройства измерения деформаций сдвига клеевого соединения:  
1 – керамическая оболочка, 2 – металлический шпангоут, 3 – клеевое соединение, 4 – жесткий обод, 5 – датчик перемещения, 6 – зажимное соединение

На схеме показаны три датчика перемещений. Очевидно, что при условии нахождения точек торца оболочки в одной плоскости этого достаточно. На рисунке 9 показана схема для расчета перемещения плоскости торца оболочки.

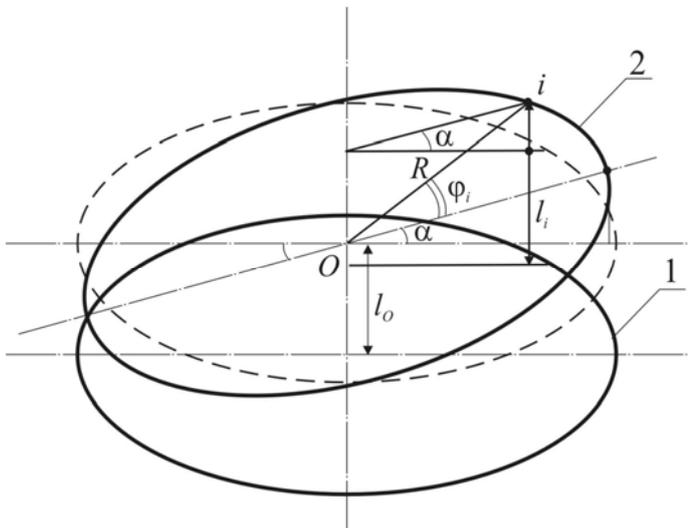


Рисунок 9 – Расчетная схема к определению положения плоскости торца оболочки:  
1 – положение плоскости в начальный момент времени, 2 – положение при силовом нагружении.

Перемещение  $i$ -ой точки плоскости торца оболочки в осевом направлении:

$$l_i = l_0 + R \sin \alpha \cos \varphi_i, \quad (8)$$

где  $l_0$  – перемещение центра плоскости,  $R$  – радиус оболочки,  $\alpha$  – угол поворота плоскости относительно первоначального положения,  $\varphi_i$  – угол относительно точки с максимальным перемещением в осевом направлении.

Определение местоположения плоскости торца оболочки по трем точкам заключается в решении системы уравнений:

$$\begin{cases} l_1 = l_0 + R \sin \alpha \cos \varphi_0 \\ l_2 = l_0 + R \sin \alpha \cos(\varphi_0 + \varphi_2) \\ l_3 = l_0 + R \sin \alpha \cos(\varphi_0 + \varphi_3) \end{cases} \quad (9)$$

где  $l_1, l_2, l_3$  – измеренные величины перемещений в трех точках плоскости,

$\varphi_2, \varphi_3$  – известные углы смещения двух точек относительно первой,  $\varphi_0$  – смещение первой точки относительно точки с максимальным перемещением.

В целях увеличения точности определения распределения перемещений (при большой погрешности измерения перемещений) следует увеличить количество датчиков. В этом случае положение плоскости торца определяется по методу наименьших квадратов, чтобы сумма квадратов невязок была минимальной:

$$\sum_{i=1}^n (l_i - (l_0 + R \sin \alpha \cos(\varphi_0 + \varphi_i)))^2 = \sum_{i=1}^n f_i^2(l_0, \alpha, \varphi_0) = \min \quad (10)$$

В результате решается система уравнений:

$$\sum_{i=1}^n f_i \frac{\partial f_i}{\partial l_0} = 0; \sum_{i=1}^n f_i \frac{\partial f_i}{\partial \alpha} = 0; \sum_{i=1}^n f_i \frac{\partial f_i}{\partial \varphi_0} = 0 \quad (11)$$

Использование данного метода совместно с другими, например, радиационным (определение площади непроклея), позволит найти взаимосвязь с площадью и распределением непроклея.

В четвертой главе представлены практические результаты применения разработанных методов и средств статических испытаний. На рисунке 10 приведена блок-схема автоматизированного комплекса измерения и управления параметрами статических и повторно-статических испытаний в составе стенда ТСБ 127.00.000. С использованием разработанных алгоритмов реализовано программное обеспечение автоматизированного комплекса измерения и управления параметрами теплопрочностных и повторно-статических испытаний. Указанный комплекс полностью заменил предыдущую систему управления, использовавшую аналоговые элементы, и с успехом используется при проведении исследовательских, приемочных и серийных испытаниях всех обтекателей ракет из неметаллических материалов на стенде ТСБ 127.00.000.

Основной экономический эффект от внедрения автоматизированного комплекса заключается в уменьшении временных затрат на подготовку испытания. Затраты на отработку режима испытаний снизились в среднем с 8 до 4 часов.

В результате внедрения автоматизированного комплекса испытаний значительно увеличилась точность регулирования параметров испытаний. Максимальное отклонение регулируемого параметра не превышает 5 %.

Разработанные методы и средства испытаний и контроля внедрены в установке ОТА500 повторно-статических и теплопрочностных испытаний обтекателей ракет класса «воздух – воздух»: РПО-50, РПО-70, РПО-610М и др.

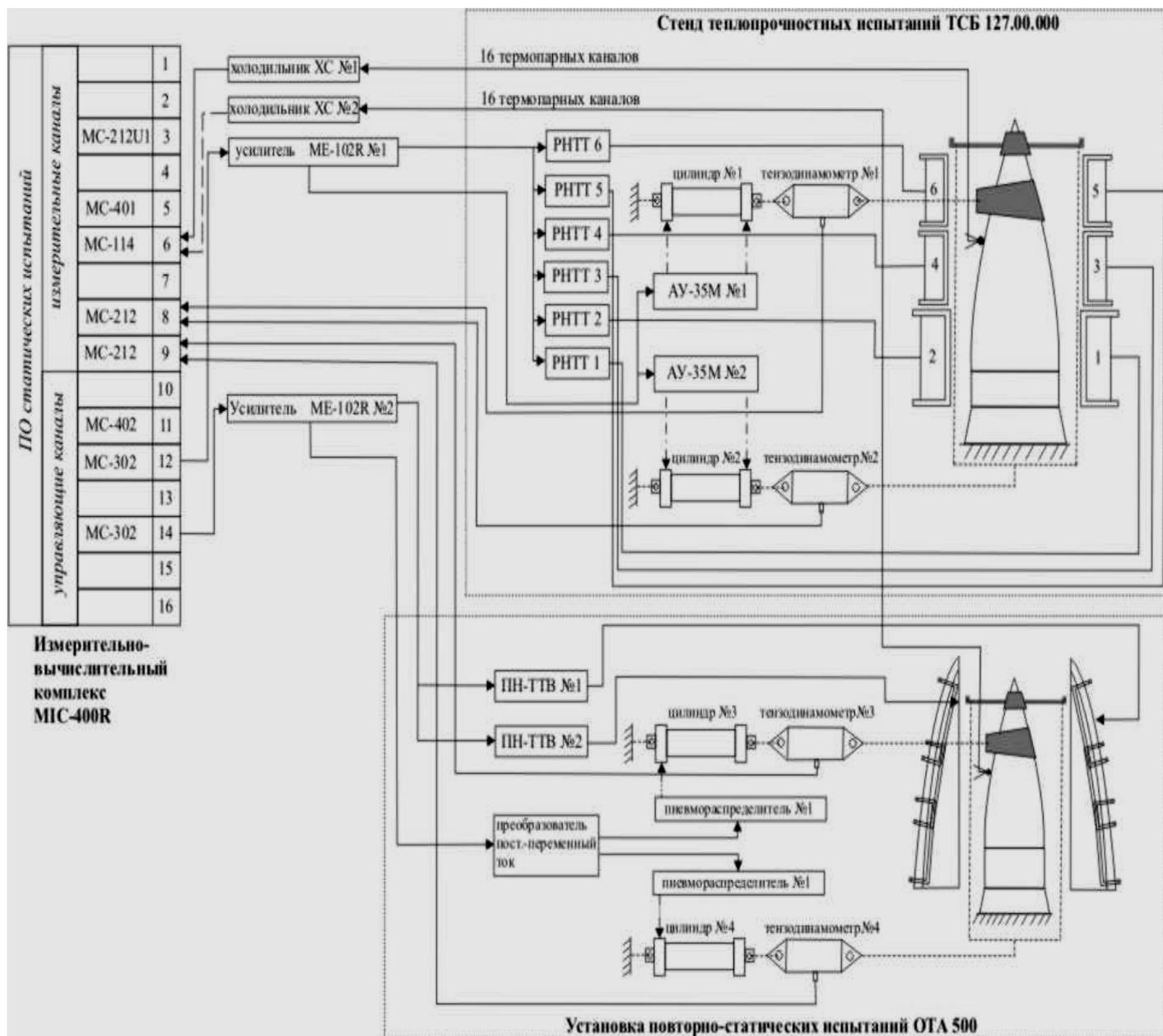


Рисунок 10 - Блок-схема автоматизированного комплекса измерения и управления

Использование разработанной пневматической системы нагружения вместо гидравлической при повторно-статических испытаниях обеспечивает экономию за счет использования более дешевых технических средств (стоимость примерно в 10 раз меньше), сокращения расхода электроэнергии (примерно в 100 раз меньше), сокращения расходных материалов.

Установлено, что определенные с помощью разработанных методов показатели качества конструкции обтекателей с успехом могут дополнить (а некоторые и заменить) существующие показатели качества конструкции (таблица 6). Качество контроля прочностных свойств конструкции с помощью новых показателей качества гораздо выше, так как в этом случае контролируется НДС элементов конструкции при эксплуатационных воздействиях. Базовые значения новых показателей качества определяются на этапе исследовательских испытаний на эталонном образце изделия.

#### Основные результаты и выводы по работе

1. Решена важная научно-техническая задача в области контроля и испытаний летательных аппаратов и их систем по повышению эффективности наземных статических испытаний конструкции обтекателей, заключающаяся в повышении точности задания воздействующих факторов, а также разработке новых методов контроля изделий.

Таблица 6 – Показатели качества конструкции керамических обтекателей

Контролируемые ПК	Объекты контроля	Особенности метода контроля
Существующие показатели качества		
Прочность на сдвиг клея, $\tau_{сдв}$	Образцы-спутники изделий	Разрушающий метод испытания на сдвиг. Метод не дает информации о действительных механических свойствах клеевого соединения конструкции натурального обтекателя.
Контроль в процессе ПСИ: стойкость к опрессовке, герметичность, рентгенотелевизионный метод контроля непрочлея	Все производимые обтекатели	Методы не дают информации о прочностных свойствах конструкции изделий. Нет экспериментальных данных о зависимости напряженно-деформированного состояния конструкции от площади непрочлея.
Стойкость к воздействиям механических, климатических факторов и аэродинамического нагружения	Выборка из партии обтекателей	Разрушающие методы испытаний. Не дают информации о свойствах конструкции всех производимых обтекателей.
Установленные показатели качества		
$\sigma_{ср}, \sigma_{max}, \alpha_0$	Все производимые обтекатели	Неразрушающий метод контроля НДС по всей окружности обтекателя. Обеспечивают прямой контроль НДС элементов конструкции при эксплуатационных воздействиях.
$I_{ср}, \gamma, \varphi_0$	Все производимые обтекатели	Неразрушающий метод контроля качества клеевого соединения. Обеспечивает контроль наиболее важных параметров клеевого соединения влияющих на НДС конструкции обтекателя

2. Разработан метод и средства контроля прочности по всей окружности обтекателя, позволяющий исключить случайный выбор направления нагружения за счет определения «слабого» направления для данного изделия. Результаты экспериментальных исследований натуральных обтекателей показывают, что использование данной системы увеличивает точность результатов статических испытаний некоторых изделий на 10 %. По результатам исследований была разработана новая методика статических испытаний, исключающая случайный выбор направления поперечного силового нагружения.

3. Разработан метод и средства контроля сдвиговых свойств клеевого соединения конструкции керамических обтекателей, обеспечивающий контроль качества операции сборки без разрушения конструкции. Разработанная электропневматическая следящая система управления давлением обеспечивает ведение режимов распределенного и сосредоточенного нагружения с точностью до 3 %.

4. Разработка алгоритмов обучения и адаптации программного обеспечения системы управления тепловыми испытаниями позволила снизить отклонение регулируемого параметра (температуры) с 15 до 5 %.

5. На основе проведенных исследований и по результатам внедрения методов испытаний и контроля получено два патента на изобретение, разработано 5 методик испытаний обтекателей и 3 методики аттестации испытательного оборудования. Результаты исследований и разработок нашли отражение в СТО «Наземные испытания изделий из конструкционных керамических и стеклопластиковых материалов для ракетно-космической и авиационной отрасли».

6. Установлены новые количественные показатели качества конструкции керамического обтекателя. Новые показатели повышают качество контроля конструкции, так как напрямую контролируют НДС элементов конструкции при эксплуатационных воздействиях.

7. Разработанные методы и средства контроля и испытаний внедрены в установке повторно-статических и теплопрочностных испытаний ОТА500, а также в автоматизированном комплексе измерения и управления параметрами статических испытаний. Внедренные разработки позволили снизить время подготовки к испытаниям в 2 раза.

Основное содержание работы опубликовано в ведущих рецензируемых изданиях, определенных ВАК

1. Барвинок, В.А. Методика статических испытаний оболочечных конструкций типа тел вращения [Текст]/ Барвинок В.А., Райлян В.С., Фокин В.И., Русин М.Ю.// *Авиационная промышленность*. 2008. №4. С.21-24.

2. Русин, М.Ю. Анализ разрушения в экспериментальных исследованиях прочности обтекателей ракет из керамических материалов [Текст]/ Русин М.Ю., Райлян В.С., Фокин В.И., Куракин В.И.// *Авиационная промышленность*. 2005. №4. С.31-38.

3. Райлян, В.С. Покрытия для исследования напряженно-деформированного состояния керамических элементов летательных аппаратов [Текст]/ Райлян В.С., Пестов А.В., Фокин В.И., Афтаев В.В.// *Авиационная промышленность*. 2006. №2. С.49-52.

4. Райлян, В.С. Применение пневматических систем нагружения в статических испытаниях обтекателей из неметаллических материалов [Текст]/ Райлян В.С., Фокин В.И., Афтаев В.В.// *Авиационная промышленность*. 2006. №3. С.14-18.

5. Райлян, В.С. Метод оценки тождественности теплового нагружения керамических оболочек типа тел вращения при наземных испытаниях по радиальному перемещению стенки [Текст]/ Райлян В.С., Русин М.Ю., Фокин В.И., Афтаев В.В.// *Авиационная промышленность*. 2008. №1. С.17-20.

6. Барвинок, В.А. Расчет и проектирование клеевого соединения тонкостенной керамической оболочки вращения с опорным шпангоутом [Текст]/ Барвинок В.А., Липовцев Ю.В., Воробьев С.Б., Фокин В.И. // *Международный журнал «Проблемы машиностроения и автоматизации»*, – М.: Машиностроение, 2008, № 3. С. 130-136.

7. Барвинок, В.А. Качество процессов производства и монтажа технических систем с учетом скрытого потребителя [Текст]/ Барвинок В.А., Клочков Ю.С., Фокин В.И., Любимов М.В., Гарельский В.А.// *Известия Самарского научного центра РАН. Спец. вып. Т 4*. 2008. С. 107-114.

8. Барвинок, В.А. Оценка технологического процесса с помощью показателей качества [Текст]/ Барвинок В.А., Клочков Ю.С., Фокин В.И., Игнатьев С.А., Яницкая Т.С.// *Известия Самарского научного центра РАН. Спец. вып. Т.3*. 2008. С. 136-144.

9. Барвинок, В.А. Методика контроля параметров технического состояния агрегатов [Текст]/ Барвинок В.А., Клочков Ю.С., Фокин В.И., Русин М.Ю., Игнатьев С.А.// *Известия Самарского научного центра РАН. Спец. вып. Т.4*. 2008. С. 126-135.

*в других изданиях*

10. Пат. 2249196 Российская федерация, МПК<sup>7</sup>G01L1/22. Способ испытания на прочность оболочки типа тела вращения [Текст]/ Райлян В.С., Фокин В.И.; заявитель и патентообладатель ФГУП «ОНПП «Технология»; опублик. 20.11.05, Бюл. №9 – 5 с.

11. Пат. 2316088 Российская федерация. МПК<sup>7</sup>G01K5/50. Антенный обтекатель летательного аппарата [Текст]/ Куракин В.И., Русин М.Ю., Райлян В.С., Кубахов С.М., Фокин В.И.; заявитель и патентообладатель ФГУП «ОНПП «Технология»; опублик. 10.02.07, Бюл. №10 – 3 с.

12. Райлян, В.С. Определение общего изгибающего момента при статических испытаниях обтекателей методами тензометрирования [Текст]/ Райлян В.С., Грацианский Ю.А., Фокин В.И.// *Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов: Тезисы докладов науч.-тех. конф. 12-14 октября 2004 г. – Обнинск*. 2004. С.90.

13. Райлян, В.С. Система сканирования силовой нагрузки при статических испытаниях обтекателей ракет [Текст]/ Райлян В.С., Фокин В.И.// *Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов: Тезисы докладов науч.-тех. конф. 12-14 октября 2004 г. – Обнинск*, 2004. С.103.

14. Райлян, В.С. Применение пневмоприводов для задания силовой нагрузки в процессе теплопрочностных испытаний [Текст]/ Райлян В.С., Фокин В.И., Афтаев В.В.// *Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов: Тезисы докладов науч.-тех. конф. 12-14 октября 2004 г. – Обнинск*. 2004. С.120.

15. Райлян, В.С. Метод оценки тождественности теплового нагружения керамических оболочек типа тел вращения при наземных испытаниях по перемещению тыльной поверхности стенки оболочки [Текст]/ Райлян В.С., Фокин В.И., Афтаев В.В.// *Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий: Труды междунар. конф. 18-22 сентября 2006 г. – АР Крым*. 2006. С.348.

Подписано в печать 06.02.09. Формат 60×48 1/16.

Бумага офсетная. Печать оперативная.

Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

---

Отпечатано с готового оригинала-макета в СГАУ.

443086, Самара, Московское шоссе, 34