

Глава 4

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ СОВРЕМЕННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОБЪЕКТОВ РКТ

Традиционные механизмы совершенствования системы контроля качества в ракетно-космической отрасли не всегда применимы в силу следующих факторов:

- дефицита конкурентных процедур;
- уникальности создаваемой техники;
- длительности и ресурсоемкости процесса создания изделий РКТ;
- наличия широкой кооперации разработчиков;
- расширенной сферы взаимодействия заказчика с головным разработчиком по согласованию работ по всей кооперации.

Качество РКТ связано, как правило, с дефектами, заложенными на этапе проектирования, производства и проявляющимися в процессе эксплуатации. Любые свойства РКТ, в том числе и дефектологические, могут проявляться лишь во взаимодействии с внешней средой, включающей технические средства, персонал и информационное окружение.

В зависимости от целей разработки и этапов жизненного цикла РКТ дефектологические свойства разделяют на дефектогенность, дефектабельность и дефектоскопичность.

Дефектогенность определяется влиянием следующих факторов:

- численность разработчиков, их профессиональные и психофизиологические характеристики;
- условия и организация процесса разработки РКТ;
- характеристики инструментальных средств и компонент РКТ;
- сложность решаемых задач;
- степень агрессивности внешней среды (потенциальная возможность внешней среды вносить преднамеренные дефекты).

Дефектабельность характеризует наличие дефектов РКТ и определяется их количеством и местонахождением. Факторами, влияющими на дефектабельность, являются:

- структурно-конструктивные особенности РКТ;
- интенсивность проявления и характеристики ошибок, приводящих к дефектам.

Дефектоскопичность характеризует возможность проявления дефектов в виде отказов и сбоев в процессе отработки, испытаний или эксплуатации. На дефектоскопичность влияют:

- число, типы и характер распределения дефектов в РКТ;
- устойчивость РКТ к проявлению дефектов;
- характеристики средств контроля и диагностики дефектов;
- квалификация обслуживающего персонала.

Очевидно, что формализация перечисленных выше факторов при оценке качества и надежности РКТ представляется крайне сложной задачей.

Следует отметить эффективность внедренных в последнее время систем контроля качества на ведущих предприятиях ракетно-космической промышленности России, позволивших переломить ситуацию с нарастанием аварийности в различных реализуемых проектах. Усилиями специалистов и ученых ведущих предприятий отрасли *технологические аспекты* обеспечения качества производства изделий РКТ получили достаточно хорошую теоретическую и практическую основу. Дальнейшее повышение уровня и глубины контроля качества производства изделий РКТ связано с увеличением доли автоматизированных систем контроля качества, исключаящих во многом влияние субъективных факторов [1–3].

Наиболее значимыми для оценки качества изделий РКТ являются *наземные испытания*. Вовлеченность в процесс наземных испытаний всех участников создания изделий РКТ придает системе контроля качества при испытаниях интегрирующий информационный характер. В этой связи создание отраслевой системы автоматизированного контроля качества РКТ может стать весьма перспективным в первую очередь для обработки данных и удаленного контроля наземных испытаний РКТ всеми участниками кооперации, а в последующем для автоматизированной оценки качества РКТ на финальной стадии наземной обработки.

Использование подобной системы позволит:

провести инвентаризацию и систематизацию результатов всех видов испытаний РКТ;

обеспечить интеллектуальную, информационную и программно-математическую поддержку процесса контроля качества и анализа состояния элементов РКТ на всех этапах жизненного цикла;

унифицировать программные комплексы моделирования физических и инженерных процессов в интересах оптимизации сложных ресурсоемких натуральных испытаний образцов РКТ;

обеспечить регламентацию создания, ведения и использования отраслевых информационных банков данных о результатах испытаний;

оптимизировать расходы за счет централизованного использования облачных информационных технологий системы: хранения и доступа к большому объему экспериментальных данных, вычислительных ресурсов суперкомпьютеров, моделей и программно-математических пакетов моделирования физических процессов, методик и алгоритмов обработки экспериментальных данных и т.п.

обеспечить доступ к актуальной нормативной базе (ГОСТам, ОСТам и т.д.);

организовать хранение и доступ к интеллектуальной составляющей испытательной практики (конструкторской и технологической документации обеспечения испытаний, техническим заданиям и техническим решениям, программам-методикам, техническим справкам, циклограммам испытаний,

алгоритмам управления и контроля и т.д.), аккумулирующей опыт проведения испытаний;

обеспечить оперативный доступ заказчиков к информации о текущем состоянии подготовки испытательного стенда к проведению испытания (исполнении планов-графиков работ, расходовании средств и т.п.);

обеспечить заказчику возможность объективно оценить возможности и стоимость проведения испытаний нового изделия исходя из анализа технико-экономических показателей проведения испытаний аналогичного или близкого по характеристикам изделия.

Поэтапный мониторинг состояния разработки испытаний и контроля качества будет выполняться с использованием своеобразного «единого виртуального паспорта» образца РКТ. «Единый виртуальный паспорт» может рассматриваться как одно из направлений реализации CALS-технологии, предусматривающей информационную поддержку жизненного цикла соответствующего изделия РКТ.

4.1. Принципы и подходы к построению автоматизированной системы контроля качества

Современные изделия РКТ являются сложными и дорогостоящими техническими системами. Их эффективность во многом характеризуется достигнутым уровнем качества, которое формируется в процессе проектирования и конструирования, реализуется на этапе производства и поддерживается на этапе эксплуатации. *Оценка достигнутого уровня качества осуществляется с помощью наземных испытаний*, которые можно рассматривать как своеобразную обратную связь в системе управления качеством изготовления (рис. 4.1).

На предшествующих этапах развития советской и российской ракетно-космической промышленности созданы эффективная методология и промышленные технологии обеспечения высокого качества РКТ, основанные на экстенсивных методах создания изделий в условиях практически неограниченного финансирования, материально-технического государственного обеспечения и концентрации прочих усилий и ресурсов.

Эта методология закреплена в Положениях РК-88, РК-98 и РК-11, утвержденных на государственном уровне, а также в государственных стандартах. В частности, в Положении РК-11 предусмотрено использование таких информационных инструментов, как головные организации по системе информации (ГОСИ) в Роскосмосе и Министерстве обороны РФ, имеющие общую базу данных об изделиях и целый ряд других нормативных документов и информационных средств.

В ГОСТ РО 1410-002–2010 «Система информации о техническом состоянии и надежности космических комплексов и входящих в их состав изделий»

обозначены все субъекты, участвующие в контроле качества. На рис. 4.2 приведена структурная схема взаимодействия субъектов, участвующих в контроле качества изделий РКТ, соответствующая Положению РК-11 и упомянутому ГОСТу. Однако в данных документах не отражены интеграционная составляющая этого взаимодействия, способы (технология) достижения объективных оценок качества, источники материальных, временных и кадровых ресурсов, необходимых для реализации процессов управления качеством.

Для достижения необходимого уровня качества РКТ в современных условиях требуется создание технологических и информационных основ с использованием новых концептуальных подходов к формированию и контролю уровня качества, движения информационных потоков в интегрированной информационной среде исследований – проектирования, производства, испытаний и эксплуатации РКТ.

Методология управления качеством должна опираться на информационные технологии (ИТ), которые представляют собой совокупность маршрутных телекоммуникационных процессов обработки и анализа информации, условий обеспечения ее достаточности и достоверности, а также унифицированных средств реализации этих процессов. ИТ позволят предприятиям – участникам создания новой техники интегрировать процессы проектирования, производства, испытания и эксплуатации изделий более эффективными способами. При этом должны быть разработаны правила и стандарты, внедрена единая отраслевая база данных по изделиям РКТ, включающая информацию о всех стадиях жизненного цикла изделий РКТ.

Основное направление обеспечения качества изделий РКТ – внедрение адаптивной интегрированной информационной модели, позволяющей повысить не только гибкость процессов разработки, производства и испытаний узлов, агрегатов и изделия в целом, но и возможность исключить из этих процессов субъективные решения и аварии.

Основой технологии контроля качества должна стать автоматизированная система оценки *интегральных характеристик изделия*, выработанных на стадиях создания и испытаний опытных образцов, их сопоставления и анализа на всех стадиях, выработки и принятия решений по результатам анализа. Примерами интегральных характеристик могут служить *технические параметры и показатели надежности изделия*. При этом в процесс автоматизированного контроля качества должны быть вовлечены все участники создания новых образцов изделий РКТ: представительства заказчика (Роскосмоса или Министерства обороны), головного предприятия – разработчика изделия, головных научно-исследовательских организаций по направлению деятельности, а также представители научно-исследовательских институтов Министерства обороны, разработчиков и изготовителей подсистем изделий, испытательных баз, обеспечивающих экспериментальную отработку изделий как на всех стадиях их создания, так и на стадии серийного производства.



Рис. 4.1. Структура системы управления качеством РКТ

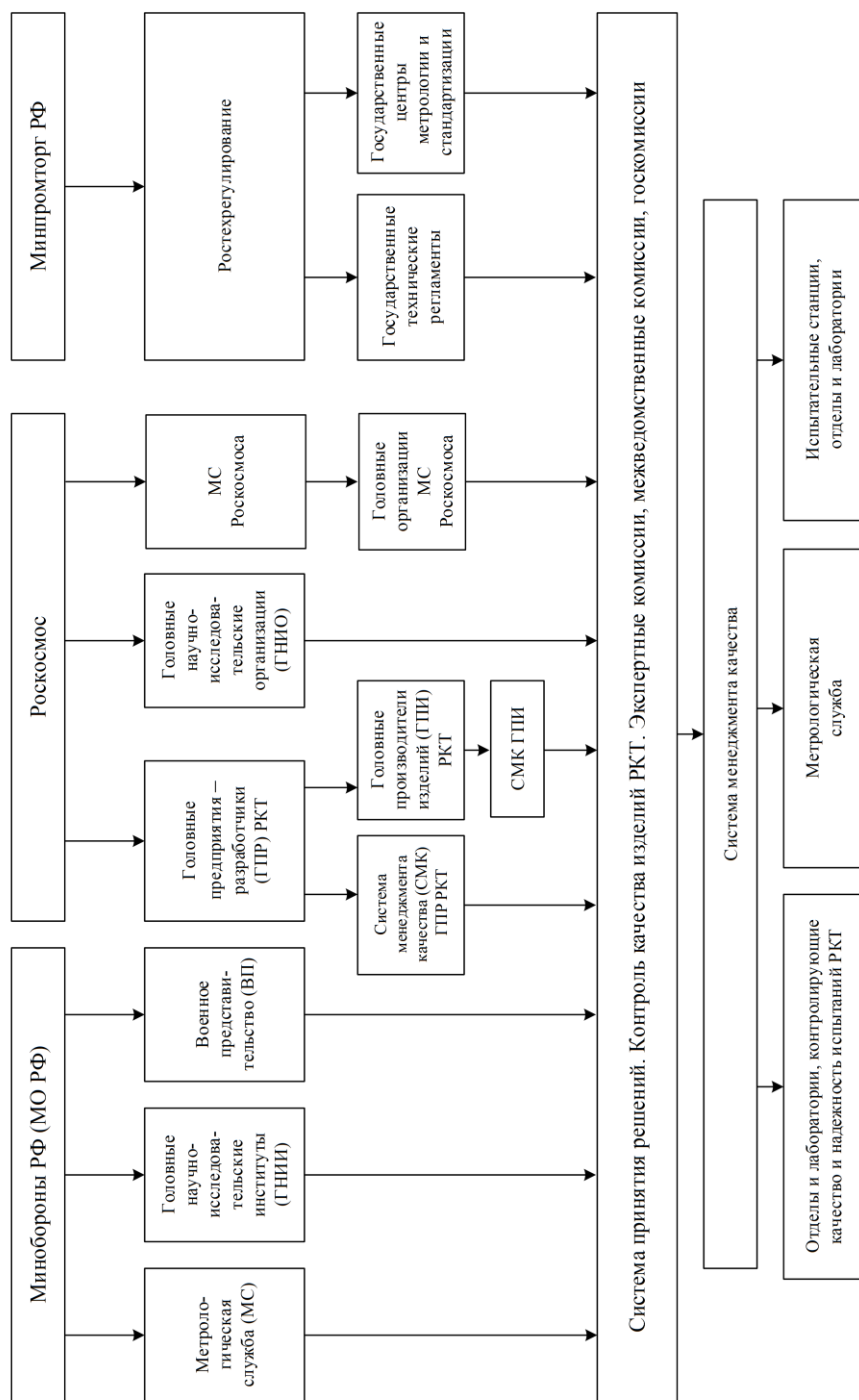


Рис. 4.2. Структурная схема взаимодействия субъектов, участвующих в контроле качества изделий РКТ

Тенденции в развитии экспериментальных баз различных передовых стран – членов космического клуба говорят о том, что целесообразную во всех отношениях политику в области контроля качества и экспериментальной оценки широкого спектра вновь создаваемой и серийно выпускаемой техники, имеющей государственные приоритеты, позволят осуществлять находящиеся исключительно в государственном ведении межведомственные испытательные центры (в США, например, экспериментальная база официально объявлена общегосударственным достоянием, и на этой основе определены ее статус, принципы функционирования и финансирования).

На рис. 4.3, 4.4 приведена концепция отраслевой автоматизированной системы контроля качества (АСКК) жизненного цикла изделий РКТ. На схеме отраслевой информационно-аналитический центр АСКК размещен в головном государственном испытательном центре ФКП «НИЦ РКП», имеющем огромный опыт проведения испытаний широкого спектра изделий РКТ (около 60 тыс.) начиная с ЖРД, ДУ и заканчивая космическими аппаратами и ступенями ракет-носителей.

Однако с точки зрения участников кооперации создания и сопровождения жизненного цикла изделия РКТ физическое размещение информационных и вычислительных ресурсов *не имеет никакого значения*.

Такие информационные технологии получили название «облачные». Облачные технологии – это удобная среда для хранения и обработки информации, объединяющая в себе аппаратные средства, лицензионное программное обеспечение, каналы связи, а также техническую поддержку пользователей. Работа в «облаках» направлена на снижение расходов и повышение эффективности работы предприятий. Особенности облачных технологий являются непривязанность к аппаратной платформе и географической территории и возможность масштабируемости. Клиент может работать с облачными сервисами с любой точки планеты и с любого устройства, имеющего доступ в интернет, а также оперативно реагировать на изменяющиеся задачи предприятия и потребности рынка.

Здесь уместна историческая аналогия. На начальном этапе развития вычислительной техники доминировали мэйнфреймы, обеспечивающие централизованное хранение и многопользовательскую обработку данных. Далее развитие получили технологии персональных компьютеров с локальной обработкой данных. Наконец, с развитием интернета круг эволюции замкнулся на более высоком уровне. Централизованные облачные ресурсы хранения и обработки данных де-факто уже определяют текущее состояние информационных технологий в мире. Причем пользователи этих ресурсов даже не задумываются, где находятся их данные и программы, которыми они пользуются.

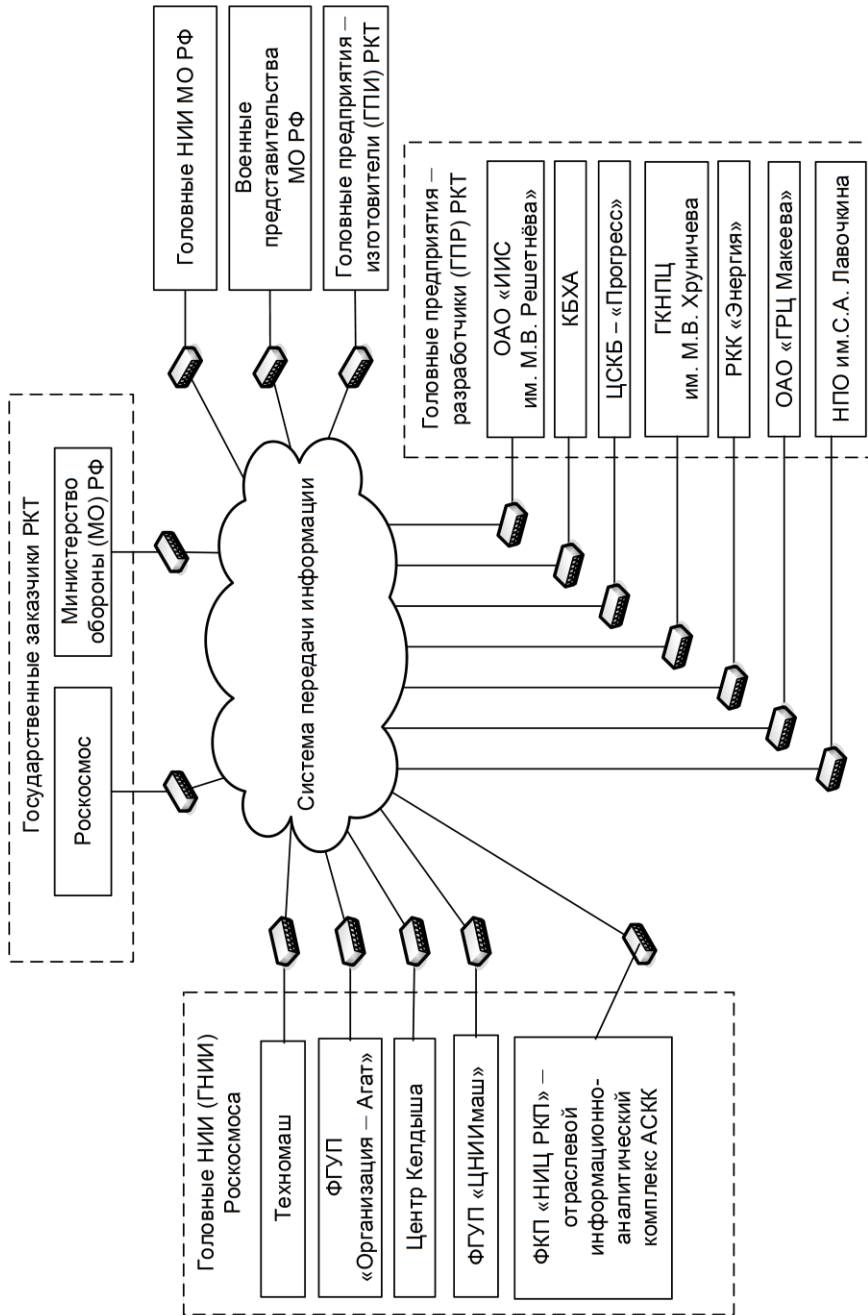


Рис. 4.3. Концепция отраслевой автоматизированной системы контроля качества (АСКК) жизненного цикла изделий РКТ

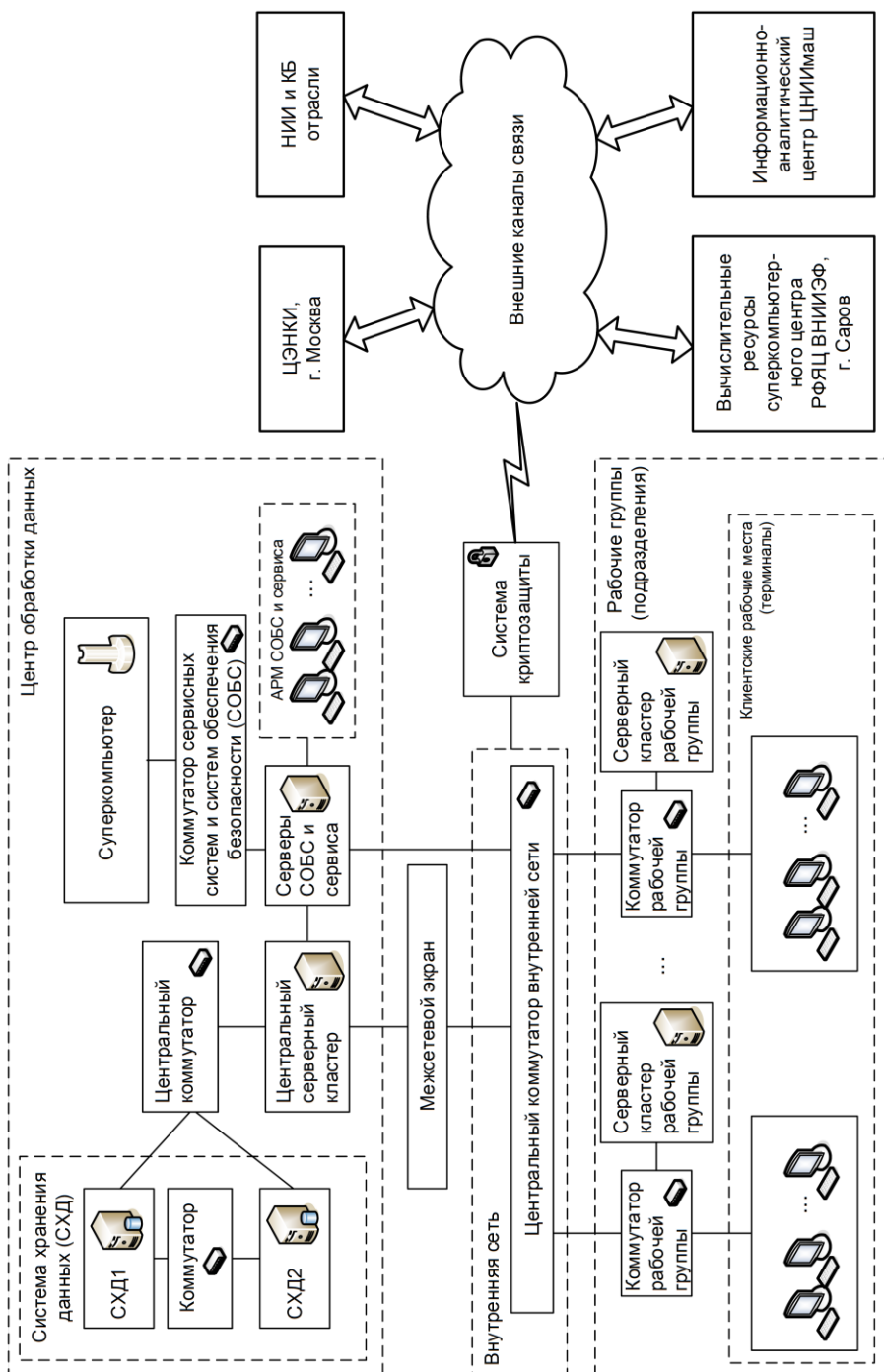


Рис. 4.4. Структурная схема организации информационно-аналитического центра в ФКП «НИЦ РКП»

В соответствии с теорией надежности наиболее оптимальным вариантом АСКК, использующей современные облачные технологии, является дублированная синхронизированная система на базе двух головных предприятий (например, ЦНИИмаш и ФКП «НИЦ РКП»).

Определяющими факторами отраслевой АСКК является наличие:

сверхбольших ресурсов хранения экспериментальных и сопутствующих данных; вычислительных ресурсов доступа и обработки данных (вычислительных и коммуникационных кластеров, серверов баз данных, серверов приложений и т.п.); высокоскоростных защищенных каналов связи;

вычислительных ресурсов математического моделирования на базе суперкомпьютерных технологий;

унифицированных алгоритмов, методик и программного обеспечения обработки данных;

технологий обработки и отображения результатов испытания в режиме реального времени;

квалифицированного персонала, способного обеспечить долговременное функционирование и развитие системы.

Структурная схема директивной технологии АСКК применительно к ЖРД приведена на рис. 4.5.

Сам процесс создания новых образцов РКТ должен сопровождаться выработкой рабочего эталона, который на каждой последующей операции более высокого иерархического уровня становится все более объемлющим и сопряженным. На стадии проектирования, поисковых НИОКР, эскизного и технического проектов разрабатываются математические модели рабочих процессов, отдельных узлов и агрегатов создаваемого изделия. На последующих стадиях модели усложняются и становятся более сопряженными.

Оценка интегральных характеристик изделий на соответствие заданным требованиям осуществляется по результатам испытаний на всех стадиях их создания. При этом обязательным фактором становится наличие единого информационного пространства на основе отраслевой базы данных по изделиям. На каждой из стадий либо происходит уточнение моделей, либо выявляются причины возможных отклонений и вносятся конструктивные изменения в создаваемое изделие (рис. 4.6).

На всех стадиях в обсуждении результатов и принятии решений участвуют представители заказчика, головное предприятие-разработчик, головные научно-исследовательские организации. По результатам конструкторско-доводочных испытаний (КДИ) и предварительных испытаний формируется предварительный рабочий эталон. Созданный образец представляется на межведомственные и сертификационные испытания. При этом вся априорная информация и результаты телеметрических измерений анализируются на достоверность, производится выбраковка отдельных «промахов», формируется и актуализируется база данных по создаваемому изделию.

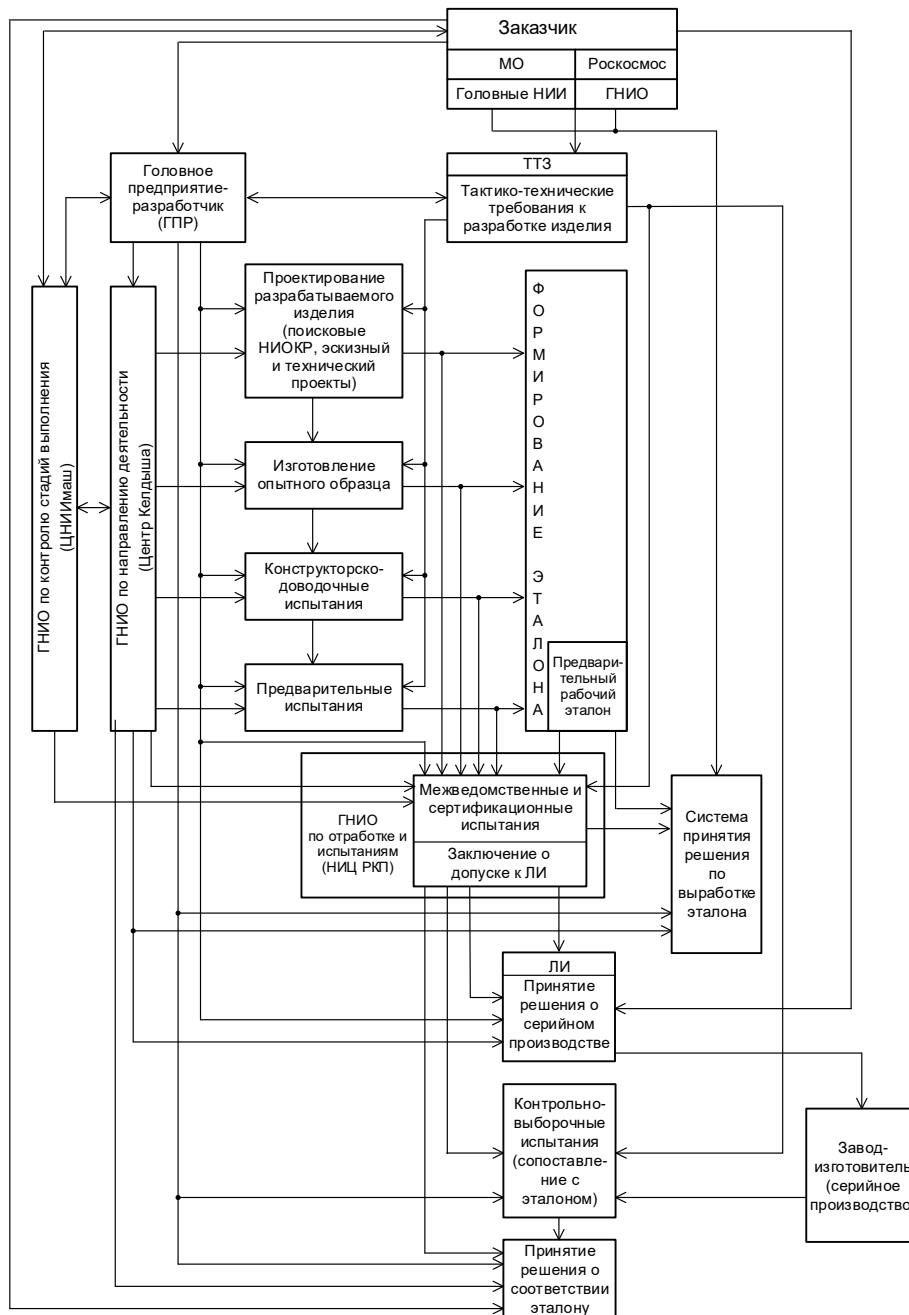


Рис. 4.5. Структурная схема директивной технологии АСКК применительно к ЖРД

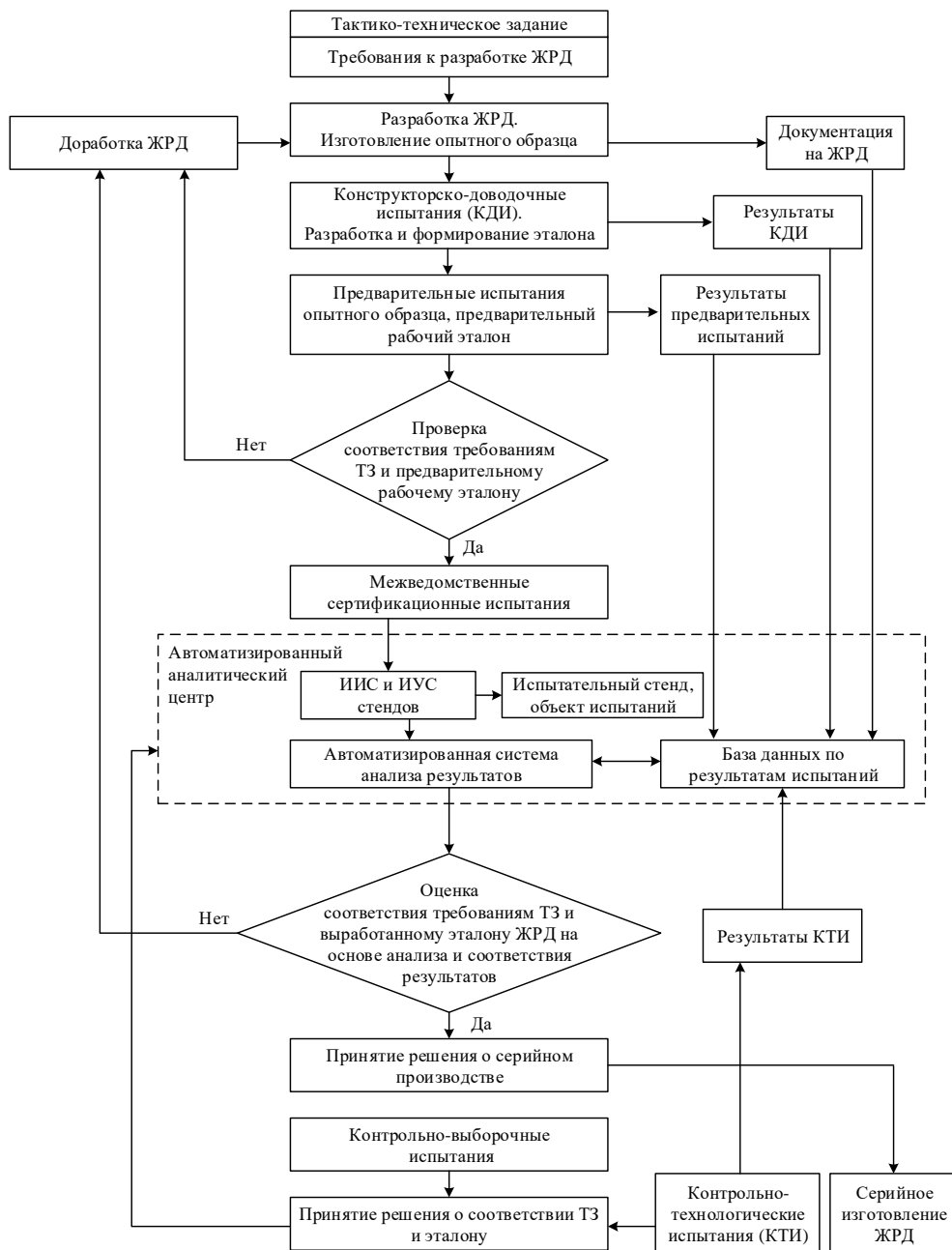


Рис. 4.6. Технология автоматизированного контроля качества

На основе анализа результатов межведомственных и сертификационных испытаний и всей поступившей априорной информации, включая проект предварительного рабочего эталона, системой принятия решений вырабатывается и уточняется рабочий эталон созданного изделия и принимается решение о допуске к летным испытаниям (ЛИ). На основании анализа результатов летных испытаний и оценки соответствия результатов выработанному эталону принимается решение о серийном производстве изделия.

На стадии серийного производства проводятся контрольно-технологические испытания изделия. При этом результаты телеметрических измерений испытаний с использованием защищенных каналов связи поступают в сертификационный центр, где на основе анализа и сопоставления полученных данных с рабочим эталоном принимается решение о соответствии рабочему эталону. При необходимости в сертификационном центре проводятся контрольно-выборочные испытания на соответствие рабочему эталону. По результатам этих испытаний и по результатам эксплуатации может иметь место или доработка изделия, или уточнение рабочего эталона.

4.2. Результаты испытаний как основа для выработки критериев качества

В подавляющем большинстве случаев, в особенности для изделий ракетно-космической техники, получить значения характеристик, выполняя измерения физических величин непосредственно в процессе проведения испытаний, практически невозможно.

Во-первых, достаточно часто характеристикой является не просто значение физической величины, а значение, полученное при выполнении определенных условий или при определенных значениях входных факторов. Например, для ЖРД значение тяги не является характеристикой само по себе. Зато значения тяги, полученные при номинальных значениях давления и температуры компонентов топлива на входе в двигатель, при номинальном положении органов управления и номинальном суммарном расходе компонентов, являются важнейшими характеристиками ЖРД. То есть для определения действительных значений характеристик необходимо выделение в результатах испытаний сочетаний условий и входных факторов, соответствующих установленным в требованиях для данных характеристик.

Во-вторых, существует значительное число физических величин, которые в процессе испытаний не могут быть получены путем прямого измерения. Простейший пример – это значения массового расхода компонентов топлива. В большинстве случаев при испытаниях выполняются измерения объемного расхода компонента, его давления и температуры, а значения массового расхода вычисляются на основе измеренных значений указанных параметров.

Таким образом, для получения характеристик нужно предварительно вычислить значения физических величин, которые не измерялись прямо в ходе эксперимента.

В-третьих, при использовании в качестве средств измерения датчиков в результате испытаний мы получаем значения выходных сигналов датчиков, которые находятся в функциональной связи с измеряемыми значениями физической величины. Однако для получения характеристик необходимо преобразовать записанный выходной сигнал в значения физической величины.

В-четвертых, полученные в результате испытаний данные представляют собой совокупность случайных величин, которые с некоторой неопределенностью характеризуют истинные значения характеристик. Следовательно, для определения характеристик необходима оценка истинного значения и неопределенности его определения или интервала для истинного значения характеристики, в котором оно может находиться с заданной вероятностью.

Причисленные причины делают неизбежной обработку результатов испытаний, которая представляет собой процесс преобразования зарегистрированной в ходе испытания информации и определения на ее основе вероятностных оценок для истинных значений характеристик объектов испытаний.

Согласно определению случайная величина – это величина, которая принимает в результате опыта одно из множества значений, причем появление того или иного значения этой величины до его получения нельзя точно предсказать.

Можно выделить следующие источники неопределенности, переносящие результаты испытаний в разряд случайных величин:

- погрешности измерения значений исследуемых характеристик;
- погрешности измерения значений влияющих факторов;
- наличие неконтролируемых (неизменяемых) внешних факторов;
- физическая неопределенность свойств объекта исследований в связи с наличием погрешностей и допусков при изготовлении его деталей.

Если результатом испытания является какая-либо измеряемая величина, то из-за погрешности средств измерения по полученному в результате эксперимента показанию прибора можно утверждать только, что истинное значение измеряемой величины находилось в интервале \pm погрешность от зафиксированного показания прибора.

Наличие погрешностей приборов не позволяет также однозначно определить значения влияющих на характеристики объекта испытаний факторов, поскольку о значениях параметров, характеризующих влияние этих факторов, также можно утверждать лишь то, что они находились в интервале \pm погрешность от зафиксированных показаний приборов.

Наличие неконтролируемых или неизменяемых внешних факторов практически неизбежно. К ним обычно относятся условия проведения эксперимента (сила ветра, влажность, температура и т.п.), влияние которых на исследуемые характеристики перед началом проведения эксперимента считалось

незначительным. Кроме того, к этому виду неопределенности относятся разного рода помехи, например электромагнитные, возникающие при включении электрооборудования, вибрационные, акустические и др.

Неизбежно также возникновение неопределенности результатов испытаний из-за наличия допусков изготовления деталей, входящих в состав объекта испытаний. В результате случайного сочетания размеров деталей свойства объекта испытаний также являются случайной величиной. Наиболее явно эта неопределенность проявляется, когда целью эксперимента является выявление свойств не конкретного экземпляра объекта испытаний, а объекта, представляющего совокупность экземпляров, изготовленных по одной документации для выполнения единых требований.

Поскольку воздействие одного или нескольких из перечисленных источников неопределенности при проведении испытаний неизбежно, то результаты испытаний вообще и испытаний ракетной техники в частности всегда представляют собой случайные величины.

Исходя из изложенного можно констатировать, что в результате испытаний не может быть получена точная количественная оценка характеристики объекта испытаний, а может быть дана только оценка вероятности нахождения значения характеристики в определенном интервале значений.

Для описания случайной величины в математике используется распределение вероятностей – закон, описывающий область значений случайной величины и вероятности их принятия.

Случайные величины разделяются на непрерывные и дискретные. Случайная величина называется дискретной, если она принимает не более чем счетное число значений.

Для описания закона распределения непрерывных случайных величин может использоваться плотность вероятности распределения.

Для нахождения точных параметров законов распределения случайной величины по значениям случайной величины необходимо использование совокупности всех ее возможных значений или генеральной совокупности значений случайной величины.

Нетрудно заметить, что для непрерывных случайных величин использование генеральной совокупности невозможно по определению, так как множество значений непрерывной случайной величины является несчетным, т.е. она может принимать бесконечное множество значений.

Учитывая, что большинство характеристик изделий РКТ представляют собой непрерывные случайные величины, можно однозначно утверждать, что при обработке результатов испытаний практически всегда используются выборки из генеральной совокупности возможных значений случайных величин.

Таким образом, корректная обработка результатов испытаний практически всегда должна выполняться с использованием методов математической статистики, предметом которой и являются определение вида и получение

оценок закона распределения случайной величины по выборкам из генеральной совокупности ограниченного объема.

На рис. 4.7 приведена упрощенная схема формирования результатов испытания. Более детальную информацию можно почерпнуть в [1, 4]. Из схемы видно, что процесс испытаний характеризуется рядом неопределенностей, влияющих на результат:

погрешностью неадекватности условий испытаний реальным условиям эксплуатации ε_1 , к появлению которой приводит неспособность испытательного оборудования в полной мере воспроизвести статистический характер эксплуатационных условий;

неопределенностью, связанной с погрешностями управляющих сигналов испытательного оборудования ε_2 ;

погрешностью условий проведения испытаний ε_3 , связанной с неуправляемыми возмущающими факторами, воздействующими на объект испытаний (колебаниями температуры, атмосферного давления, влажности, напряжения питания и т.п.);

погрешностью допусков в изготовлении деталей изделия ε_4 ;

погрешностью от использования выборочных характеристик параметров объекта испытаний вместо характеристики генеральной совокупности параметров ε_5 ;

погрешностью измерений ε_6 , зависящей от точностных характеристик контрольно-измерительного оборудования.

Полученные данные испытаний подвергаются обработке в целях получения оценок исследуемых параметров. На основе полученных результатов принимаются различного рода решения.

Результатом исследовательских испытаний являются собственно значения параметров \hat{Y} . При распространении результата \hat{Y} на выборку или партию изделий производится обобщение результатов испытаний отдельных образцов (например, вычисляется среднее арифметическое). При контрольных испытаниях значение \hat{Y} сравнивается с допуском на этот показатель, т.е. с нижним $\hat{Y}_н$, и верхним $\hat{Y}_в$ пределами. При этом формируется решение G : «Объект испытания соответствует ТУ» (годен) или «Объект испытания не соответствует ТУ» (не годен). При распространении контрольных испытаний образца на выборку или партию для определения результата \hat{G} используются алгоритмы обобщения [4].

Технология автоматизированного контроля качества изделий на базе оценки их интегральных характеристик выглядит следующим образом:

сопоставление с результатами испытаний опытных образцов;

анализ на всех стадиях создания изделия;

по результатам анализа выработка и принятие решений о годности изделия.

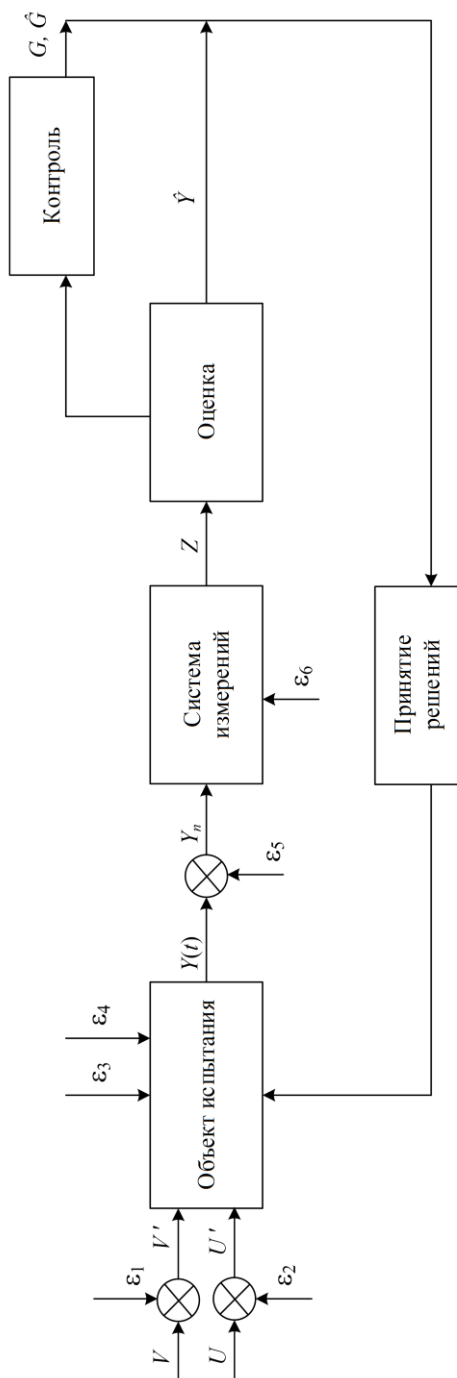


Рис. 4.7. Схема формирования результатов испытаний:

U – управляющие сигналы; ε_2 – погрешность установления управляющих сигналов; V – эксплуатационные условия; ε_1 – погрешность неадекватности условий испытаний реальным условиям эксплуатации; ε_3 – погрешность условий проведения испытаний; ε_4 – погрешность допусков в изготовлении деталей изделия; $Y(t)$ – вектор параметров объекта испытания; Y_n – выборка объема n из значений параметров объекта; ε_5 – погрешность от использования выборочных характеристик; ε_6 – погрешность измерений; Z – данные испытания; \hat{Y} – оценка параметров объекта испытания; G, \hat{G} – результат контроля; $\{\hat{Y}, G, \hat{G}\}$ – результат испытаний

Примерами интегральных характеристик могут быть технические характеристики изделия, показатели надежности, а также математические модели создаваемого образца. Одна из основных задач испытаний – оценка и контроль расчетных характеристик энергетического состояния ЖРД, ЖРДУ:

- реактивной тяги;
- массового расхода компонентов топлива;
- соотношения массовых расходов компонентов топлива;
- удельного импульса тяги;
- показателя качества сопла.

Определение этих характеристик базируется на измерении так называемых основных параметров ЖРД, ЖРДУ (табл. 4.1):

- тяги;
- объемного расхода горючего;
- объемного расхода окислителя;
- избыточного или абсолютного давления и температуры компонентов топлива, служащих для расчета плотности и массового расхода компонентов; давления в камере сгорания и форсуночных полостях двигателя;
- скорости вращения (числа оборотов) турбонасосных агрегатов (ТНА).

В табл. 4.2 представлена сложившаяся обобщенная структура основных типов статико-динамических и быстроменяющихся параметров, характеризующих рабочие процессы изделий и средств их стендовых испытаний.

Как следует из рис. 4.7, получение достоверной информации о характеристиках изделия связано с процессом снятия перечисленных выше неопределенностей.

Неопределенность, связанная с неадекватностью условий испытания реальным эксплуатационным условиям, минимизируется за счет совершенствования стендовой базы, необходимыми и достаточными мероприятиями комплексной программы экспериментальной отработки (КПЭО), широким использованием «виртуальных испытаний» с имитационным и математическим моделированием требуемого диапазона условий эксплуатации.

Неопределенность, связанная с управляющим воздействием стенда на объект испытания, нормируется в ходе выполнения работ по аттестации испытательного оборудования, проводимой согласно ГОСТ Р 8.568–97 для подтверждения воспроизведения условий испытаний в пределах допускаемых отклонений и установления пригодности испытательного оборудования для использования в соответствии с его назначением. В качестве примера в табл. 4.3 представлены фрагменты из перечня нормированных воздействий и технических характеристик воспроизведения условий испытаний, обеспечиваемых испытательным оборудованием при испытании изделия И14А125(сб.1) по теме «Ангара».

Таблица 4.1

Основные измеряемые медленноменяющиеся параметры (ММП)

Измеряемая величина	Диапазон измерения	Пределы погрешности в рабочих условиях	Рабочий диапазон частот, Гц	Рабочие среды	Показатели метрологической надежности	Наличие стандартизованных (аттестованных) МВИ	Наличие рабочих эталонов, поверочных установок
Тяга ЖРД	$10^4 \dots 5 \cdot 10^6$ Н	0,5...1,5 %	0...5	-	$P = 0,95$ $\gamma = 0,95$	ГОСТ 8.545	Нет, калибровка по ГОСТ
Объемный расход компонентов топлива - высококипящих - криогенных	1,0...900 л/с	0,5...1,5 % 0,6...2,0 %	0...1	Криогенные, углеводородные, агрессивные	$P = 0,95$ $\gamma = 0,95$	ОСТ 92-4225 ОСТ 92-4514	Есть
Массовый расход газа	$10^{-1} \dots 10$ кг/с	2,5...5,0 %	0...1	Азот, кислород, водород, гелий, воздух	Не нормируются	ОСТ 92-4442 ГОСТ 8.586	Нет
Плотность компонентов топлива ЖРД	100...1450 кг/м ³	0,15...0,25 %	0...10	Криогенные, углеводородные, агрессивные	Не нормируются	ОСТ 92-4233 ОСТ 92-4424 Косвенный метод измерений	Справочные данные ГСССД
Плотность газовых сред	$10^{-1} \dots 10^2$ кг/м ³	1,5...2,5 %	0...1	Криогенные, углеводородные, агрессивные	Не нормируются	Нет	Нет
Давления дифференциальные, избыточные	$10 \dots 5 \cdot 10^5$ Па 0,1...100 МПа	1,0...2,5 % 0,5...2,5 %	0...10	Криогенные, углеводородные, агрессивные	$P = 0,95$ $\gamma = 0,95$	ОСТ 92-4233 ОСТ 92-4310	Имеются для нормальных условий
Давления абсолютные	0,1...10 МПа	1,0...3,5 %	0...10	Криогенные, углеводородные, агрессивные	$P = 0,95$ $\gamma = 0,95$	ОСТ 92-4233 ОСТ 92-4310	Есть
Давление разреженных сред	$10^{-4} \dots 10^3$ Па	5,0...50 %	0...1	Криогенные, углеводородные, агрессивные	Не нормируются	Нет	Нет

Продолжение таблицы 4.1

Измеряемая величина	Диапазон измерения	Пределы погрешности в рабочих условиях	Рабочий диапазон частот, Гц	Рабочие среды	Показатели метрологической надежности	Наличие стандартизованных (аттестованных) МВИ	Наличие рабочих эталонов, поверочных установок
Температуры средовые и поверхностные	-100...700 °С	0,5...10 °С	0...10	Углекислотные, агрессивные	$P = 0,95$ $\gamma = 0,95$	ОСТ 92-4425 ОСТ 92-4320	Нет
Температура криогенных компонентов топлива	20...93 К	0,15...1,0 К	0...1	Криогенные	$P = 0,95$ $\gamma = 0,95$	ОСТ 92-4425 ОСТ 92-4320	Есть
Уровень жидкости дискретный	1,0...10,0 м	1,0...4,0 мм	0...100	Криогенные, углекислотные, агрессивные	Не нормируются	ОСТ 92-4225 ОСТ 92-4514	Нет
Скорости вращения (число оборотов ТНА)	$10^3 \dots 10^5$ об/мин	0,01 % 0,1 %	0...100	-	Не нормируются	МВИ в КД на изделие	Не требуются
Линейные и угловые перемещения	$10^{-4} \dots 10^{-1}$ м 0...360 °	0,5...2,5 % 1,0...2,5 %	0...10	-	Не нормируются	МВИ в КД на изделие	Есть
Концентрация примесей H ₂ и O ₂ в смесях инертных газов и воздуха	0,01...50 % об.	1,0...10 %	0...1	Азот, гелий, водород, кислород, воздух	$P = 0,95$ $\gamma = 0,8$	Нет	Имеются для нормальных условий
Лучистые потоки имитатора солнечного излучения (ИСИ)	0,5...4 кВт/м ² , диапазон длин волн 0,25...2,5 мкм	5,0...7,0 %	0...0,05	Остаточные газы и пары в термокамере (ТБК)	Не нормируются	Нет	Нет
Тепловые потоки имитатора космических излучений (ИКИ)	0,01...2,5 кВт/м ² , диапазон длин волн 0,2...10,0 мкм	2 %	0...1	Остаточные газы и пары в ТБК	Не нормируются	Нет	Нет

Таблица 4.2
Основные измеряемые статико-динамические (СДП) и быстроменяющиеся (БМП) параметры

Измеряемая величина	Диапазон измерения		Пределы погрешности в рабочих условиях, %		Рабочий диапазон частот, Гц		Рабочие среды	Показатели метрологической надежности	Наличие стандартных тестовых (аппаратных) МВИ	Наличие рабочих этапов, повторовных установок
	СДП	БМП	СДП	БМП	СДП	БМП				
Тяга ЖРД малой тяги	0,5...4000 Н	-	1,5...2,1	-	0...40	-				
Вектор тяги ЖРД малой тяги	0,5...600 Н	-	Не нормируются	-	Не нормируются	-	Воздух, пары топлива	Не нормируются	Нет	Нет
Массовый расход компонентов топлива	0,005...1,0 кг/с	-	1,0...2,0	-	0...20	-	Углекислотные, агрессивные	Не нормируются	Нет	Нет
Массовый расход газобразных компонентов топлива	0,01...1,0 кг/с	-	3,0...5,0	-	0...20	-	Кислород	Не нормируются	Нет	Нет
Давления избыточные	0,1...50 МПа	-	0,6...2,5	-	0...500	-	Углекислотные, криогенные, агрессивные	$P=0,95$ $\gamma=0,95$	ГОСТ 8.546	Нет
Давления абсолютные	0,1...10,0 МПа	-	0,6...2,5	-	0...500	-	Углекислотные, криогенные, агрессивные	$P=0,95$ $\gamma=0,95$	ГОСТ 8.546	Нет
Пульсации давления	-	$\pm 10^2 \dots \pm 5,0$ МПа	-	15...30	-	$10 \dots 2 \cdot 10^4$	Углекислотные, криогенные, агрессивные	Не нормируются	ОСТ 92-1624 ГОСТ 8.546	Нет
Акустические давления	-	90...180 дБ	-	3...5 дБ	-	$20 \dots 10^4$	Воздух, пары топлива	Не нормируются	ОСТ 92-1624	Нет

Продолжение таблицы 4.2

Измеряемая величина	Диапазон измерения		Пределы погрешности в рабочих условиях, %		Рабочий диапазон частот, Гц		Рабочие среды	Показатели метрологической надежности	Наличие стандартных (аппаратных) МВИ	Наличие рабочих эталонов, поверочных установок
	СДП	БМП	СДП	БМП	СДП	БМП				
Деформации от-носительные механические	$10^5 \dots 10^3$	-	1,0...2,0	-	0...700	-	Воздух, пары топлива	Не нормируются	Нет	Нет
Виброскорения	-	$10 \dots 10^4$ м/с ²	-	15...25	-	$10 \dots 2 \cdot 10^4$	Воздух, пары топлива	Не нормируются	ОСТ 92-1624	Есть
Токи исполнительных органов	0,1 ... 100 А	-	0,5...1,0	-	$0 \dots 4 \cdot 10^3$	-	-	Не нормируются	Нет	Есть
Напряжения электрические	0,1 ... 50 В	-	0,5...1,0	-	0...1000	-	-	$P=0,95$ $\gamma=0,9$	Нет	Есть
Команды, дискретные по времени	0,001 ... 1000 с	-	0,005...0,01	-	0...1000	-	-	$P=0,995$ $\gamma=0,95$	Нет	Есть

Таблица 4.3

Перечень нормированных воздействий и технических характеристик воспроизведения условий испытаний, обеспечиваемых испытательным оборудованием ИС-102 при испытании изделия И14А125(сб.1) и перечень систем ИС-102, подлежащих аттестации в обеспечение испытаний изделия И14А125(сб.1)

Наименование нормированных воздействий и технических характеристик воспроизведения условий испытаний	Значение контролируемого параметра	Обозначение параметра по программе измерений стеновых параметров изделия И14А125	Стеновые системы, подлежащие аттестации	
1. Заправка-слив бака окислителя жидким кислородом, ГОСТ 6331–78, сорт 1				
Большой расход заправки	3,4...3,8 кг/с	(PM3СБ, PM4СБ) _{фр} (индекс ср – среднее за 1 с) T2СБ	Система заправки жидким кислородом, система заправки, слива и дренажей «О» изделия И14А125, система управления заправкой бака «О», подсистема автоматического регулирования и контроля	
Температура заправки	89...91 К			
Малый расход заправки	1,5...3,0 кг/с	(PM5СБ, PM6СБ) _{фр} +(PM11СБ, PM12СБ) _{фр}		
Температура заправки	89...91 К	T2СБ		
Расход подпитки	0,38...0,50 кг/с	(PM5СБ, PM6СБ) _{фр} T2СБ		
Температура подпитки	87...91 К			
Расход захлаживания бака "О"	0,5...1,5 кг/с	(PM5СБ, PM6СБ) _{фр}		
Температура захлаживания	90...94 К	T2СБ		
Расход подслива через 230	0,08...0,1 кг/с	(PM7СБ, PM8СБ) _{фр}		
Температура подслива через 230	<95 К	T2СБ		
Расход слива при ХСИ	54...66 кг/с	(PM13СБ, PM14СБ) _{фр}	Система заправки керосином, система заправки, слива и дренажей «Г» изделия И14А125, система управления заправкой бака «Г», подсистема автоматического регулирования и контроля	
Температура слива при ХСИ	88...95 К	T22СБ		
2. Заправка-слив бака горючего РГ-1, ТУ 38.001244-81				
Большой расход заправки	4...6 кг/с	(PM15СБ, PM16СБ) _{фр} +(PM17СБ, PM18СБ) _{фр} T40СБ		
Температура заправки	253...303 К			
Малый расход заправки	0,3...1,13 кг/с	(PM17СБ, PM18СБ) _{фр}		
Температура заправки	253...303 К	T40СБ		
Расход слива при ХСИ	21,6...26,4 кг/с	(PM19СБ, PM20СБ) _{фр}		
Температура слива при ХСИ	253...323 К	T43СБ		

Продолжение таблицы 4.3

Наименование нормированных воздействий и технических характеристик воспроизведения условий испытаний	Значение контролируемого параметра	Обозначение параметра по программе измерений стеновых параметров изделия И14А125	Стеновые системы, подлежащие аттестации
3. Зарядка погруженных шар-баллонов газобразным гелием, ТУ 0271-135-31323949-2005, марка «Б»			
Давление на входе в ОИ	210...230 кгс/см ² изб.	Д96СБ	Система газоснабжения,
Температура на входе в ОИ	90...120 К	Т95СБ	система газоснабжения изделия И14А125,
Расход максимальный на входе в ОИ	0,05±0,005 кг/с	Р31ШБ (расчетный, без оценки погрешности)	подсистема автоматического регулирования и контроля,
			система управления нештатными элементами
4. Зарядка шар-баллонов управления газобразным азотом техническим, ГОСТ 9273-74			
Давление на входе в ОИ	220...230 кгс/см ² изб.	Д31ШУ	Система газоснабжения,
Расход максимальный на входе в ОИ	0,003...0,005 кг/с	Р31ШУ (расчетный, без оценки погрешности)	система газоснабжения изделия И14А125
5. Наземный наддув бака «О» газобразным гелием, ТУ 0271-135-31323949-2005, марка «Б»			
Давление на входе в ЭПЦС-09	220...240 кгс/см ² изб.	Д104СБ	Система газоснабжения,
Давление на входе в ОИ (справочно)	20...30 кгс/см ² изб	ДННБО	система газоснабжения изделия И14А125,
Расход на входе в ОИ (справочно, обеспечивается гидравлической характеристикой испытательного оборудования, поставляемого разработчиком изделия)	0,02...0,04 кг/с	РННБО (расчетный)	система управления нештатными элементами, комплект ЭПЦС,
			информационно-управляющая система ИУС-И2
6. Наземный наддув бака «Г» газобразным азотом техническим, ГОСТ 9273-74			
Давление на входе в ЭПЦС-04	200...210 кгс/см ² изб.	Д102СБ	Система газоснабжения,
Давление на входе в ОИ (справочно)	20...30 кгс/см ² изб.	ДННБГ	система газоснабжения изделия,
Расход на входе в ОИ (справочно, обеспечивается гидравлической характеристикой испытательного оборудования, поставляемого разработчиком изделия)	0,05...0,06 кг/с	РННБГ (расчетный)	система управления нештатными элементами, комплект ЭПЦС,
			информационно-управляющая система ИУС-И2
7. Горячий наддув бака «О» газобразным гелием, ТУ 0271-135-31323949-2005, марка «Б»			
Давление на входе в ОИ (справочно)	3...15 кгс/см ² изб.	Д81СБ	Система газоснабжения,
Температура на входе в ОИ	480...560 К	Т86СБ	система газоснабжения изделия И14А125,
Расход газа на входе в ОИ	0,02...0,05 кг/с	РННБО (расчетный, без оценки погрешности)	система управления нештатными элементами, подсистема автоматического регулирования и контроля

Продолжение таблицы 4.3

Наименование нормированных воздействий и технических характеристик восприятия производения условий испытаний	Обозначение параметра по программе измерений стендовых параметров изделия И14А125	Стендовые системы, подлежащие аттестации
8. Продувка газогенератора и камер газобразным азотом техническим, ГОСТ 9273-74		
Давление на входе в ОИ	Значение контролируемого параметра	Система газоснабжения, система газоснабжения изделия И14А125, система управления нештатными элементами
Расход газа на входе в ОИ	3...5 кг/с/см ² изб. <i>Уточняется</i>	Д193СБ Р1ПрВ1 (расчетный)
9. Горячий наддув бака «Г» газобразным гелием, ТУ 0271-135-31323949-2005, марка «Б»		
Давление на входе в ОИ (справочно)	1,5...15 кг/с/см ² изб.	Д179СБ
Температура на входе в ОИ	480...560 К	Т84СБ
Расход газа на входе в ОИ	0,004...0,012 кг/с	Р1ГНБ (расчетный, без оценки погрешности)
10. Вакуумирование двигателя по линии горючего через штуцер В/Д		
Давление в полости горючего	≤15 мм рт. ст.	Д113СБ
Время вакуумирования	≤135 с	
11. Термостатирование промежуточного отсека (СТПБ1)		
Давление газа на входе в ОИ	5...8 кг/с/см ² изб.	Д1
Расход газа на входе в ОИ	0,9...1,1 кг/с	РМСТ1 (расчетный)
Температура газа на входе в ОИ	283...298 К (с точностью поддержания ±2°)	Т1
12. Термостатирование межбакового отсека (СТПБ2)		
Давление газа на входе в ОИ	7,76...8,24 кг/с/см ² изб.	Д2
Расход газа на входе в ОИ	0,666±0,06 кг/с	РМСТ2-2 (расчетный)
Температура газа на входе в ОИ	283...313 К (с точностью поддержания ±2°)	Т2
13. Термостатирование пусковых ампул двигателя		
Давление газа на входе в ОИ	9...11 кг/с/см ² изб.	Д190СБ
Расход газа на входе в ОИ	0,015...0,025 кг/с	Р1ПрПАГ (расчетный)
Температура газа на входе в ОИ	303...308 К	Т193СБ

Продолжение таблицы 4.3

Наименование нормированных воздействий и технических характеристик воспронизведения условий испытаний	Значение контролируемого параметра	Обозначение параметра по программе измерений стеновых параметров изделия И14А125	Стеновые системы, подлежащие аттестации
14. Точность реализации циклограммы испытания			
Ток выходного управляющего сигнала ЭЭС1–ЭЭС4	$\pm 50 \text{ мА} \pm 0,1 \%$	$I_{r1} \dots I_{r4}$	Информационно-управляющая система ИУС-И2,
Частота управляющего сигнала качания камер двигателя	$0,1 \dots 30 \text{ Гц}$	$f_{r1} \dots f_{r4}$	информационно-управляющая система ИУС-ЭГС2,
Время исполнения команд циклограммы	$0 \dots 1000 \text{ с} \pm 10 \text{ мс}$	Гц	система аварийной защиты САЗ-2

Точность и достоверность измерения параметров являются важными факторами при оценке качества создаваемых образцов РКТ. Особую роль при этом играет метрологическое обеспечение, основное назначение которого – минимизация неопределенности, связанной с погрешностью измерений [5, 6]. В частности, для повышения точности измерения основных параметров и оценки погрешности измерений при ограниченной точности датчиков-преобразующей аппаратуры (ДПА) используются методические приемы структурной и временной избыточности измерительной информации.

С учетом особой важности результатов измерения основных параметров ЖРД и ЖРДУ разработаны межотраслевые методики выполнения измерений (МВИ), стандартизованные на уровне государственных и отраслевых стандартов, прошедшие согласование с головными метрологическими организациями и представительствами Минобороны.

И наконец, неопределенность, связанная с погрешностями обработки информации, может быть уменьшена за счет увеличения статистической базы экспериментальных данных (использования хранилищ экспериментальных данных по изделию на протяжении его жизненного цикла), унификации пакетов прикладных программ и методик обработки.

Рассмотрим **взаимодействие систем испытаний и контроля качества с точки зрения информационно-энтропийного подхода**. Если в качестве внешней управляющей системы (УС) рассматривать систему контроля качества, а объекта управления (ОУ) – систему испытаний, то эффективность управления с точки зрения информационно-энтропийного подхода определяется соотношением (см. гл. 1)

$$H(X/Y) = H(Y)_{\max} - H(X) + H(Y/X),$$

где Y – система контроля качества; X – система испытаний; $H(X/Y)$ – степень несоответствия управляющего воздействия состояниям ОУ, т.е. условная энтропия воздействия УС на ОУ; $H(Y)_{\max}$ – безусловная энтропия состояний ОУ, отражающая разнообразие возможных состояний ОУ и тем самым неопределенность относительно ожидаемого в УС сообщения о состоянии ОУ; $H(X)$ – безусловная энтропия воздействий со стороны УС для ОУ, отражающая разнообразие управляющих воздействий УС; $H(Y/X)$ – условная энтропия состояний ОУ для УС после получения соответствующих сообщений от ОУ.

Из приведенного выражения следует, что повышение эффективности (уменьшение энтропии) системы контроля качества $H(X/Y)$, в задачи которой входят оценка и контроль соответствия испытательной системы целям и задачам экспериментальной отработки изделия на протяжении его жизненного цикла, происходит за счет:

уменьшения $H(Y)_{\max}$, т.е. сокращения разнообразия возможных состояний испытательной системы путем минимизации перечисленных выше неопределенностей (погрешности неадекватности условий испытаний реальным усло-

виям эксплуатации; неопределенности, связанной с погрешностями управляющих сигналов испытательного оборудования, воздействующих на объект испытания; погрешностей контрольно-измерительного оборудования и т.д.);

увеличения разнообразия управляющих воздействий $H(X)$. Поток отрицательной энтропии $H(X)$ есть не что иное, как ресурсное обеспечение системы контроля качества в виде научно-технического, методического, технологического, финансового, кадрового и другого обеспечения;

уменьшения степени несоответствия получаемых системой контроля качества сообщений о реальном состоянии испытательной системы $H(Y/X)$. Несответствие между предполагаемым и реальным положениями дел автоматически приводит к неадекватным управленческим воздействиям. Единственным способом решения данной проблемы является уменьшение доли человеческого фактора как источника неосознанной или сознательной дезинформации и увеличение доли автоматизированных систем информационного сопровождения контроля качества (систем планирования, анализа, контроля и т.п.).

Список литературы к главе 4

1. **Недайвода А.К.** Технологические основы обеспечения качества ракетно-космической техники. М.: Машиностроение, 1998.
2. **Альбрехт А.В., Арзуманов Ю.Л., Баталин Н.Н.** Оптимальное управление качеством сборки агрегатов изделий РКТ // Научно-технические разработки КБ «Салют» 2009–2011 гг. Вып.3 / Ю.О. Бахвалов, А.В. Альбрехт, Ю.А. Абросимов и др.; под общ. ред. Ю.О. Бахвалова М.: Машиностроение / Машиностроение-Полет, 2012.
3. **Кучкин В.Н., Кучкин К.В., Сайдов Г.Г.** Теоретические основы разработки испытательного оборудования для ракетно-космической техники / под ред. Г.Г. Сайдова. М.: Машиностроение/Машиностроение-Полет, 2014.
4. **Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем / Л.Н. Александровская, В.И. Круглов, А.Г. Кузнецов и др.:** Учеб. пособие. М.: Логос, 2003.
5. **Закон РФ № 102-ФЗ** от 26.06.2008 г. «Об обеспечении единства измерений».
6. **Основы построения информационно-измерительных систем: Пособие по системной интеграции / Н.А. Виноградова, В.В. Гайдученко, А.И. Карякин и др.;** под ред. В.Г. Свиридова. М.: Изд-во МЭИ, 2004.
7. **Сайдов Г.Г., Виноградов В.В., Поляхов А.Д.** Реорганизация экспериментальной стендовой базы – необходимость сегодняшнего дня и залог успеха в будущем // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». №4. 2011.
8. **ГОСТ 8.000–00 ГСИ.** Основные положения.
9. **ГОСТ 8.009–84 ГСИ.** Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
10. **ГОСТ РВ 8.560–95 ГСИ.** Средства измерений военного назначения. Испытания и утверждение типа.
11. **ГОСТ РВ 8.570–98 ГСИ.** Метрологическое обеспечение испытаний вооружения и военной техники. Основные положения.
12. **ГОСТ 8.417-2002 ГСИ.** Единицы величин.
13. **ГОСТ Р 8.563–2009 ГСИ.** Методики (методы) измерений.
14. **ГОСТ Р 8.654–2009 ГСИ.** Требования к программному обеспечению средств измерений. Основные положения.
15. **ГОСТ Р 8.568–97 ГСИ.** Аттестация испытательного оборудования. Основные положения.
16. **ГОСТ Р 8.596–2002 ГСИ.** Метрологическое обеспечение измерительных систем. Общие положения.
17. **ПР 50.2.104–09 ГСИ.** Порядок проведения испытаний стандартных образцов или средств измерения с целью утверждения типа.
18. **МИ 1317–04 ГСИ.** Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров.