

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического
приборостроения»

Скорина С.Ф.

**ИСПЫТАНИЯ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ, РАКЕТНОЙ И
КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

Учебное пособие

Санкт-Петербург

2017

УДК 614:551.521 (076.5)

Скорина С.Ф. Испытания изделий авиационной, ракетной и космической техники. – СПб: ГУАП, 2017. – 137 с.

Учебное пособие предназначено для студентов направлений подготовки: 24.03.02 Системы управления движением и навигации, 24.05.06 Системы управления летательных аппаратов, а также для студентов, обучающихся по образовательным программам: Техническая эксплуатация и ремонт авионики, Эксплуатация и испытания авиационной и космической техники.

Учебное пособие рассмотрено и одобрено кафедрой Эксплуатации и управления в аэрокосмических системах 19.06.16 протоколом № 8.

Рецензент: профессор кафедры физики
Санкт-Петербургского государственного
университета промышленных технологий и дизайна, д.т.н.

© Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического
приборостроения, 2017

Редактор
Компьютерная верстка

Сдано в набор 00.00.00. Подписано к печати 00.00.00. Формат 60x84 1/16. Печать офсетная. Усл.печ.л.
0,0. Тираж 50 экз. Заказ №

Редакционно-издательский отдел
Отдел электронных публикаций и библиографии библиотеки
СПбГУАП
190000, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 67

Введение

1. Классификация испытаний
2. Цель и задачи экспериментальной отработки
3. Классификация воздействий, оказывающих влияние на материалы, детали и системы РКТ в процессе эксплуатации
4. Физические основы влияния факторов космического пространства на состояние и работоспособность изделий РКТ
5. Способы проведения испытаний
6. Статические и вибрационные испытания

6.1. Статические испытания

- 6.1.1. Нагрузатели для статических испытаний
- 6.1.2. Тензометрические методы измерения деформаций при статических испытаниях
- 6.1.3. Обобщенная структурная схема испытаний на статические нагрузки
- 6.1.4. Система статических испытаний авиационного двигателя ПД-14 АО «ОДК-Пермские моторы» в состав АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» [23]

6.2. Вибрационные испытания

- 6.2.1. Оборудование для проведения вибрационных испытаний

7. Испытания на воздействие инерционных нагрузок
8. Испытания на воздействие ударных нагрузок
9. Испытания на воздействие акустических нагрузок.
10. Общая характеристика и проблемы проведения тепловакуумных испытаний

11. Особенности моделирования космического вакуума

11.1. Приборы для измерения давления разреженных газов

12. Моделирование электромагнитного излучения Солнца

13. Испытания на воздействие радиационных факторов и магнитных полей

13.1. Источники радиации, применяемые при экспериментальной отработке

14. Испытания на воздействие электрических и магнитных полей

15. Задачи и структура космодрома «Плесецк»

Источники информации

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с ГОСТ 16504-81 «Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения» [4] под испытаниями понимается экспериментальная определение количественных и (или) качественных свойств объекта испытаний как результата воздействия на него при его функционировании. Испытания являются непременным атрибутом, органической составной частью практически всех этапов жизненного цикла изделий и систем авиационной и ракетно-космической техники (АРКТ). На ранних этапах жизненного цикла, при исследованиях и проектировании новых образцов техники, с помощью испытаний оценивают перспективы предлагаемых подходов и возможность достижения поставленной цели. При проектировании и производстве с помощью различных видов испытаний удается контролировать соответствующие процессы с целью обеспечения заданного высокого качества продукции, при эксплуатации - испытания позволяют решить задачу обеспечения и поддержания заданного уровня эксплуатационной надежности. Проведение испытаний позволяет

определить пригодность применения комплектующих изделий и узлов для изготовления систем, проконтролировать качество получаемых изделий, определить возможность использования тех или иных технологических приемов и методов при изготовлении изделий.

Правильная организация испытаний позволяет избежать получение недостоверных результатов и предотвратить выпуск некачественных изделий. Важнейшей частью организации испытаний является грамотная разработка, утверждение и исполнение методик проведения испытаний, что позволяет получать конечные результаты с высокой достоверностью даже при работе персонала с недостаточно высокой квалификацией.

История испытаний АРКТ, естественно, началась с момента появления первых летательных аппаратов тяжелее воздуха. Для начального периода истории испытаний было характерно совмещение функций конструктора, испытателя и летчика. Как правило, каждый авиатор-конструктор своими силами проектировал и строил самолет, был его летчиком-испытателем, а впоследствии – пользователем или эксплуатантом. Позже, в переходный период появилась специальность летчика–испытателя. В этот период конструкторы совместно с летчиками-испытателями разработали ряд методик испытаний самолетов и установили нормативы для различных характеристик самолета. Для современного периода характерно наличие научно-обоснованных и тщательно отработанных программ и методик проведения испытаний для различных типов и изделий АРКТ. В ходе испытаний первых самолетов получали только качественную оценку основных летных характеристик и общую качественную оценку безопасности полета. Контрольно-измерительная аппаратура состояла из простых приборов контроля работы двигателя. Указатель скорости самолета часто отсутствовал. На начальном этапе толчком к развитию самолетостроения послужила первая мировая война. Боевое применение самолетов во время первой мировой войны потребовало оценки их летно-технических качеств. Важной вехой для отечественного самолетостроения и авиационной науки стала Октябрьская революция. В марте 1918 года под личным руководством Н.Е.

Жуковского была организована научно-исследовательская и испытательная «Летучая лаборатория». Основной её задачей было исследование натуральных моделей самолетов. В начале 30-х годов одновременно с интенсивным развитием научной, теоретической и экспериментальной базы научно-исследовательской и испытательной работы проводилась специализация целых коллективов, что способствовало резкому повышению качества и уровня исследований, увеличению их объема. Появление, в конце 30-х годов, двигателей с наддувом, винтов изменяемого шага с автоматическим управлением, убирающегося шасси, привело к росту высоты и скорости полета, усложнению решаемых задач, увеличению тяжести последствий возможных отказов. Более сложная техника обусловила появление наземных видов отработки и испытания авиационной техники. Последующее развитие реактивной авиации обусловило для конструкторов, технологов, испытателей появления ряда совершенно новых задач по аэродинамике, прочности, системам управления и другим направлениям. Создаются более совершенные методики наземных и летных испытаний. Появляются более совершенные виды измерений и обработки результатов испытаний. Создаются специализированные центры, институты и летающие лаборатории для отработки новых двигателей, отдельных узлов и агрегатов, более совершенных бортовых систем, для проведения натуральных исследований по аэродинамике. Применительно к изделиям ракетно-космической техники (РКТ) для их экспериментальной отработки и осуществления запуска космических аппаратов в Советском союзе в пятидесятые годы прошлого века были созданы испытательные полигоны и космодромы Капустин Яр, Плесецк, Байконур, Ясный, а в Российской Федерации – космодром Восточный [9, 29].

1. Классификация испытаний

ГОСТ 16504-81 насчитывает свыше пятидесяти различных видов испытаний продукции. В настоящее время не существует единого подхода к классификации испытаний, который бы в равной степени учитывал

специфические особенности как самих изделий, так и различных этапов жизненного цикла изделий АРКТ. В ряде случаев характер проводимых испытаний и последовательность их проведения на различных предприятиях существенно отличаются. Это обусловлено принятой технологией изготовления, конкретным типом проектируемого и изготавливаемого изделия, его назначением, объемом производства и целым рядом других факторов. В настоящее время на предприятиях, выпускающих продукцию АРКТ сложилась следующая классификация по нескольким признакам [2, 3, 19, 20]: по цели проведения (исследовательские, контрольные, сравнительные и определительные); по условиям и месту проведения (лабораторные, эксплуатационные); по виду воздействия (механические, климатические, биологические, радиационные, электромагнитные, специальных средств, термические, на комплексное воздействие); по продолжительности воздействия и значению воздействующих параметров (нормальные, ускоренные и сокращенные); по влиянию на объект испытаний (неразрушающие, разрушающие); по определяемым характеристикам (функциональные, на надежность, на безопасность); по стадиям жизненного цикла изделий (на стадии разработки, на стадии производства, сертификационные, на стадии эксплуатации); по принципу осуществления (физические, с помощью моделей).

Физические испытания могут проводиться как при внешних воздействующих факторах, создаваемых искусственным путем с помощью испытательных стендов (стендовые испытания) или специальных методов и средств, применяемых в лабораторных условиях (лабораторные испытания), так и при естественных внешних воздействующих факторов.

Лабораторные и стендовые испытания изделий отличаются от реальной эксплуатации тем, что при их проведении пока еще не представляется возможным моделировать все внешние воздействия одновременно в той случайной совокупности, которая имеет место при реальной эксплуатации. Обычно при лабораторных и стендовых испытаниях аппаратура подвергается воздействию одной или нескольких определенных нагрузок. Это приводит к результатам, несколько отличающимся от полученных при реальной

эксплуатации. Поэтому при исследовании влияния внешних воздействующих факторов наряду с лабораторными и стендовыми испытаниями проводятся также испытания изделий в естественных условиях окружающей среды.

В зависимости от условий и места проведения испытаний при воздействии естественных внешних факторов различают полигонные и натурные испытания изделий. Полигонные испытания объекта проводят на специально оборудованном полигоне. Широко распространены полигонные испытания изделий, проводимые при воздействии внешних климатических факторов. При этом испытания изделий, предназначенных для эксплуатации и хранения только в ограниченных климатических районах, проводят на полигонах, расположенных в пунктах, характеризующих, климатическое воздействие этих районов.

Натурные испытания объекта характеризуются выполнением следующих обязательных условий. Испытаниям подвергается непосредственно изготовленное изделие без применения моделей. Испытания проводятся в условиях и при воздействиях на изделия, соответствующих реальным условиям применения по целевому назначению. Определяемые характеристики свойств объекта испытаний измеряются непосредственно без использования аналитических зависимостей, отражающих физическую структуру объекта испытаний и его составных частей. При этом допускается применение математического аппарата статистической обработки экспериментальных данных. К натурным испытаниям относится, в частности, опытная эксплуатация изделий.

Цель полигонных и натурных испытаний – исследование комплексного влияния естественно воздействующих факторов на изменение параметров и свойств объекта испытаний, уточнение механизмов отказов изделий при их эксплуатации и хранении [18]. Эти испытания обеспечивают:

- получение наиболее полной и достоверной информации о комплексном влиянии факторов окружающей среды на параметры, характеризующие изделия;
- позволяют исследовать характер реальных физико-химических процессов,

протекающих в материалах и комплектующих изделиях при воздействии естественных внешних факторов;

- дают возможность уточнять данные, полученные при испытании объекта под воздействием внешних факторов, создаваемых искусственным путем, а также нормы на допустимые изменения параметров (критерии годности).

По результатам полигонных и натурных испытаний разрабатывают рекомендации по способам защиты изделий от внешних воздействующих факторов или минимизации их влияния на процессы эксплуатации

В силу специфики натурных испытаний, заключающейся в их большой продолжительности, сложности и высокой стоимости, их проведение требует четкой организации и оптимального планирования. С целью ограничения объема испытаний программа их проведения должна базироваться на анализе и всестороннем учете ранее полученных результатов эксплуатации, лабораторных и стендовых испытаний аналогичных образцов, а также требований, предъявляемых к изделиям. Это позволяет минимизировать затраты средств и ресурсов на проведение испытаний для достижения требуемого результата – успешного завершения процесса экспериментальной отработки испытываемого изделия АРКТ [1].

К физическим испытаниям при естественных внешних воздействующих факторах следует отнести также эксплуатационные испытания, т.е. испытания объекта, проводимые при эксплуатации. Одним из основных видов эксплуатационных испытаний является опытная эксплуатация изделий. В ряде случаев проводится подконтрольная эксплуатация, которая условно может быть отнесена к эксплуатационным испытаниям. При подготовке к подконтрольной эксплуатации специально предназначенный для ее проведения персонал, руководствуясь специально разработанной документацией, осуществляет сбор, учет и первичную обработку информации, полученной в процессе эксплуатации.

Испытания с использованием моделей проводят методами физического и математического моделирования. Применение этих методов позволяет отказаться от ряда сложных физических испытаний реальных изделий или их

макетов, что в конечном итоге позволяет сократить затраты на экспериментальную отработку изделий [6, 8].

Физическое моделирование заключается в том, что первичный параметр объекта испытаний (процесс в элементе схемы или какое-либо внешнее воздействие) заменяется простой физической моделью, имитирующей изменение данного параметра. При этом могут использоваться статистические методы испытаний. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) заключается в том, что при помощи многократных случайных испытаний (вычислений, производимых над случайными числами) определяют вероятность появления некоторого случайного события (математического ожидания случайной величины). Данный метод позволяет в частности определить характеристики безотказности изделий АРКТ, исходя из предположения, что известен механизм возникновения и развития отказов при различных сочетаниях значений параметров изделий, выбираемых случайным образом согласно заданной статистической модели.

Метод статистических испытаний физическим моделированием объекта предусматривает проведение испытаний на реальных объектах или их моделях. При испытаниях на реальных объектах производят исследование возможных причин возникновения отказов изделий и их последствий. Для этого, в частности, в электрическую принципиальную схему изделия могут искусственно вводить неисправности в виде обрывов, коротких замыканий или установки комплектующих элементов с параметрами, не соответствующими нормативным значениям. Проведение испытаний на электронных моделях объекта заключается в том, что определенные комплектующие элементы схемы заменяются физическими моделями, позволяющими изменять величины характеризующих их параметров. При этом моделирование различных элементов осуществляют на специальных стендах, позволяющих воспроизводить случайные процессы изменения параметров комплектующих элементов.

Математическое моделирование базируется на использовании уравнений, связывающих входные и выходные параметры объекта испытаний.

(В предыдущем методе такая связь реализуется непосредственно в физической модели.) Эти уравнения выводят на основании изучения конкретных изделий и их внутренних функциональных связей, после чего и осуществляют математическое описание установленных связей с учетом воздействия на изделия различных факторов. Основной недостаток метода – необходимость проведения огромного объема теоретических и экспериментальных исследований для определения соотношений, характеризующих математическую модель объекта, что требует применения высоко производительных вычислительных средств и обязательного знания вероятностных характеристик входных воздействий.

Разновидностью статистических методов испытаний, применяемым на практике, являются граничные испытания изделий, которые проводятся для определения зависимостей между предельно допустимыми значениями параметров объекта и режимом его эксплуатации. Они являются экспериментальным методом, основанным на физическом моделировании области значений первичных параметров, при которых выходные параметры изделий находятся в пределах допуска, т.е. в области безотказной работы изделий при изменениях первичных параметров. Однако определить область безотказной работы изделий при одновременном изменении многих первичных параметров не представляется возможным. Поэтому на практике ограничиваются нахождением граничных точек области безотказной работы изделий при изменении какого-либо одного первичного параметра изделий (параметр граничных испытаний), сохраняя значения других неизменными. В этом и состоит смысл граничных испытаний.

Для реализации метода граничных испытаний используют изменение выходного параметра изделий с помощью искусственных приемов. Для этого, например, может быть изменено значение одного из питающих напряжений, выбранное в качестве первичного параметра граничных испытаний. Границы области, в пределах которой изделие работает безотказно, определяются при изменении напряжения до момента возникновения отказа изделий по исследуемому выходному параметру в случае, когда остальные первичные

параметры изделий имеют номинальные (или заданные) значения. Затем при некотором отклонении одного из первичных параметров изделий от номинального (или заданного) значения снова наблюдают за выходным параметром изделий при изменении напряжения. Ясно, что при отклонении первичного параметра в обе стороны от номинального значения выходной параметр будет выходить за пределы допуска при различных значениях напряжения.

Исследовательские испытания проводятся для изучения определенных характеристик свойств объекта и их целью являются:

- определение или оценка показателей качества функционирования, испытываемого объекта в определенных условиях его применения;
- выбор предпочтительных режимов работы объекта или наилучших характеристик свойств объекта;
- сравнение множества вариантов реализации объекта при проектировании и аттестации;
- построение математической модели функционирования объекта (оценка параметров математической модели);
- отбор существенных факторов, влияющих на показатели качества функционирования объекта;
 - выбор вида и полноты математической модели объекта (из заданного множества вариантов).

Особенностью исследовательских испытаний является факультативный, не обязательный характер их проведения, так они не проводятся при сдаче готовой продукции. Определительные испытания проводят для определения значений характеристик объекта с заданными значениями показателей точности и достоверности получаемых результатов.

Сравнительные испытания проводят для сравнения характеристик свойств аналогичных или одинаковых объектов. На практике иногда возникает необходимость сравнить качество аналогичных по характеристикам или даже одинаковых по назначению изделий, но выпускаемые, например, различными предприятиями одного или нескольких ведомств. Для этого испытывают

сравниваемые объекты в идентичных условиях. Сравнительные испытания проводят для сравнения характеристик свойств аналогичных или одинаковых объектов.

Контрольные испытания проводятся для контроля качества объекта. Испытания этого вида составляют наиболее многочисленную группу испытаний.

На этапе проектирования проводят доводочные, предварительные и приемочные испытания.

К видам испытаний готовой продукции относят квалификационные, предъявительские, приемосдаточные, периодические, инспекционные, типовые, аттестационные, сертификационные. Доводочные испытания – это исследовательские испытания, проводимые при проектировании изделий с целью оценки влияния вносимых в нее изменений для достижения заданных значений показателей качества, а предварительные испытания являются контрольными испытаниями опытных образцов и (или) опытных партий продукции с целью определения возможности их предъявления на приемочные испытания.

Приемочные испытания также являются контрольными испытаниями. Это испытания опытных образцов, опытных партий продукции или уникальных изделий единичного производства, проводимые для решения вопроса о целесообразности постановки этой продукции (изделий) на производство и (или) использования ее по назначению. Приемочные испытания опытных образцов или партий изделий проводятся, как правило, для решения вопроса о целесообразности начала их производства, а приемочные испытания изделий единичного производства – для решения вопроса о целесообразности передачи этих изделий в эксплуатацию.

Квалификационные испытания проводятся на стадии освоения производства изделий. Целью их является оценка готовности предприятия к выпуску продукции данного типа в заданном объеме. Для их производства используют установочную серию или первую промышленную партию.

Предъявительские испытания изделий проводятся обязательно службой технического контроля качества предприятия-изготовителя перед

предъявлением ее для приемки представителем заказчика, потребителем или дугами органами приемки.

Приемосдаточные испытания проводятся в освоенном производстве. Это контрольные испытания изготовленной продукции при приемном контроле. Приемосдаточные испытания, как правило, проводятся изготовителем продукции. Если на предприятии-изготовителе имеется представитель заказчика, приемосдаточные испытания проводятся им в присутствии представителя-изготовителя.

Периодические испытания проводят с целью контроля стабильности качества продукции и возможности продолжения ее выпуска в объеме и в сроки, установленные нормативно-техническими документами.

Инспекционные испытания – это особый вид контрольных испытаний. Они проводятся в выборочном порядке с целью контроля стабильности качества установленных видов продукции специально уполномоченными организациями.

При выявлении в процессе производства недостатков конструкции изделий или технологического процесса их изготовления возникает необходимость совершенствования конструкции или техпроцесса. Целесообразность и эффективность предложенных изменений выявляют с помощью типовых испытаний. Типовые испытания – это контрольные испытания выпускаемой продукции, проводимые с целью оценки эффективности и целесообразности вносимых изменений в конструкцию, или технологический процесс.

Выпускаемые изделия могут оцениваться по категориям качества или на соответствие характеристик требованиям национальных и международных стандартов. Неотъемлемой процедурой такой оценки являются аттестационные или сертификационные испытания: Испытания, проводимые для оценки уровня качества продукции при ее аттестации по категориям качества, называются аттестационными.

Сертификационные испытания – это контрольные испытания продукции, проводимые с целью установления соответствия характеристик ее свойств национальным и (или) международным нормативно-техническим документам.

В зависимости от продолжительности все испытания подразделяются на нормальные, ускоренные, сокращенные. Под нормальными испытаниями изделий понимаются испытания, методы и условия проведения которых обеспечивают получение необходимого объема информации о характеристиках свойств объекта в такой же интервал времени, как и в предусмотренных условиях эксплуатации.

Ускоренные испытания – это такие испытания, методы и условия проведения которых обеспечивают получение необходимой информации о качестве изделий в более короткий срок, чем при нормальных испытаниях. В документации на методы испытаний конкретных видов изделий указываются значения воздействующих факторов и режимы функционирования, соответствующие нормальным условиям испытаний. Обычно нормальными считаются условия, характеризуемые температурой окружающей среды 288...308 К, атмосферным давлением $8,4 \cdot 10^4 \dots 10,7 \cdot 10^4$ Па и относительной влажностью 48...80 % [1].

Сокращенные испытания проводятся по сокращенной программе. В зависимости от уровня значимости испытаний изделий их можно разделить на государственные, межведомственные и ведомственные. К государственным испытаниям относятся испытания установленных важнейших видов изделий, проводимые головной организацией по государственным испытаниям, или приемочные испытания, проводимые государственной комиссией или испытательной организацией, которой предоставлено право их проведения.

Межведомственные испытания – это испытания изделий, проводимые комиссией из представителей нескольких заинтересованных министерств и ведомств, или приемочные испытания установленных видов продукции для приемки составных ее частей, разрабатываемых совместно несколькими ведомствами. Ведомственные испытания проводятся комиссией из представителей заинтересованного министерства, ведомства или корпорации.

Классификационным признаком вида испытаний также могут выступать: вид воздействия, результат воздействия, определяемые характеристики. По виду

воздействия выделяют: механические; климатические; тепловые; радиационные; электрические; электромагнитные; магнитные; химические; биологические; специальные. По результату воздействия различают: неразрушающие; разрушающие; на стойкость; на прочность; на устойчивость. По определяемым характеристикам различают следующие виды испытаний: на надежность; на безопасность; на транспортабельность; граничные испытания; технологические испытания.

Эксплуатационные испытания являются самыми продолжительными по времени и проводятся в типовых условиях эксплуатации. Целью испытаний является проверка функционирования, работоспособности всех систем в процессе длительной эксплуатации. Во время эксплуатации проводится инженерный анализ отказов и неисправностей, замечаний эксплуатирующего персонала по применению по назначению и техническому обслуживанию. Такие испытания, как правило, являются частью комплекса приемо-сдаточных и государственных испытаний.

Испытания на надежность проводятся для определения количественных показателей безотказности, ресурсных характеристик и предельных сроков хранения и работы. При обработке результатов испытаний проводятся качественная и количественная оценка показателей надежности. Основной задачей качественной оценки, является анализ отказов и неисправностей, появляющиеся в ходе технической эксплуатации. Количественная оценка надежности заключается в определении показателей надежности на основе статистических данных об отказах, возникших в процессе эксплуатации.

Для опытного и серийного производства изделий РКТ характерны отработочные и производственные испытания. Отработочные испытания в свою очередь разделяют на наземные, полигонные и летные, а наземные – на автономные и комплексные [15]. Автономные испытания разделяют на конструкторские, доводочные и чистовые. Производственные испытания разделяют на типовые, периодические, приемосдаточные, а типовые испытания

в свою очередь могут быть индивидуально-контрольными, установочными и контрольно-выборочными.

2. Цель и задачи экспериментальной отработки

Целью экспериментальной отработки изделий АРКТ является доведение изделия в целом, а также его комплектующих до состояния, полностью удовлетворяющего требованиям технического задания. Экспериментальная отработка, являясь естественным продолжением проектирования, завершает процесс создания изделия. Однако, она является не только конечным звеном, но и самым тесным образом переплетается практически со всеми этапами жизненного цикла от исследования и проектирования до производства и эксплуатации. При проектировании учитываются не только теоретические предпосылки и актуальные вызовы на создание новых образцов АРКТ, но и опыт создания других аналогичных изделий, опыт их отработки, результаты проведенных при этом исследований [13]. Однако этого опыта подчас оказывается недостаточно, особенно при проектировании новых изделий, существенно отличающихся от предшествующих и по объему и качеству решаемых задач, по предъявляемым к ним требованиям, выполнение которых далеко не всегда возможно с помощью известных, хорошо отработанных схемных и конструктивных решений. Возникает необходимость в применении новых материалов и конструкций, принципиально новых систем, которые к моменту проектирования данного изделия практикой еще не проверены, поэтому не могут считаться надежными. Экспериментальную отработку всех этих новшеств необходимо проводить одновременно с разработкой эскизного проекта, а в ряде случаев и со значительным опережением, так как в эскизный проект должны вноситься решения в той или иной степени апробированные расчетом или экспериментом. Несоблюдение этого требования при отсутствии на сегодняшний день адекватной теории оптимального управления всеми этапами жизненного цикла изделий АРКТ неоднократно приводило к тому, что

спроектированное и изготовленное изделие АРКТ после проведенных испытаний приходилось в значительной степени проектировать заново.

На начальном этапе развития основная экспериментальная отработка изделий РКТ происходила при летно-конструкторских испытаниях (ЛКИ). В наземных условиях автономно обрабатывались только комплектующие изделия и системы. При таком подходе для отработки и доводки всего изделия в целом требовалось значительное число дорогостоящих запусков. По мере усложнения изделий, связанном с расширением и усложнением решаемых с их помощью задач, резко возрастает стоимость как самих изделий РКТ, так стоимость проведения запусков. Надежды на существенное уменьшение стоимости запуска на типовую околоземную орбиту единицы массы полезной нагрузки, связанные с использованием многоразовых транспортных космических систем, к сожалению, пока не оправдываются и остаются надеждами.

Последнее обусловило изменение стратегия экспериментальной отработки, которая сейчас ориентируется на единичные пуски или на отказ от ЛКИ. Отказ от летных испытаний практикуется в случае создания космических аппаратов (КА), оснащенных уникальной, дорогостоящей научной аппаратурой, или аппаратов, предназначенных для исследования дальних планет солнечной системы или космических зондов. Современная стратегия экспериментальной отработки основывается преимущественно на наземной отработке изделий РКТ при возможно максимально полной имитации штатных условий эксплуатации аппарата. Поэтому при планировании и проведении испытаний считается актуальным и значимым следующий принцип: целесообразно все, что можно, проверять в наземных условиях [3, 20].

Примером реализации такого подхода к экспериментальной отработке является отработка КА «Аполлон», при создании которого значительная, если не большая часть ассигнований на реализацию программы высадки человека на Луну была направлена на создание совершенной наземной экспериментальной базы. И это оказалось в полной степени оправданным и эффективным, поскольку позволило выявить свыше 90% конструктивных недостатков именно при исследовательских и контрольно-технологических (приемочных) испытаниях.

Предстартовые и летные испытания позволили выявить лишь 5,2 % недостатков в конструкции КА «Аполлон» [2]. Следует при этом отметить, что под исследовательскими испытаниями понимают испытания, проводимые с целью определения возможности создания конструкции и определения ее способности выполнять требуемые функции в течение заданного времени в диапазоне внешних условий, которые могут иметь место в полете или в условиях наземной подготовки к полету.

Объектами исследовательских испытаний могут являться: макет опытного образца, опытный образец и промышленный образец. Контрольно-технологические испытания представляют собой проверку уже штатного изделия на отсутствие производственных дефектов. Программа этих испытаний включает функциональные испытания и испытания отдельных фрагментов изделия на воздействие эксплуатационных условий перед их монтажом, а также комплексные испытания систем и подсистем после монтажа.

Для достижения цели испытаний сложной технической системы необходимо решить ряд задач:

- провести оценку правильности основных конструктивных и схемных решений и при необходимости выполнить корректировку на соответствующих этапах жизненного цикла изделий в процессе отработки;
- выполнить проверку и отработку функционирования всех комплектующих изделий и систем, отдельных конструктивных узлов и приборов в эксплуатационных условиях и отработку их взаимодействия в общей конструктивной схеме;
- провести исследование причины возникновения возможных неисправностей и отработку технологии последующей эксплуатации изделия РКТ.

При планировании экспериментальной отработки решается задача поиска оптимального варианта ее реализации. В качестве критериев оптимальности могут выступать: минимальная стоимость, минимальные сроки и заданная надежность отработки. Под стоимостью понимают стоимость всех работ, связанных с проведением экспериментов на всех этапах, включая и затраты на проектирование, изготовление и освоение испытательного

оборудования. Минимизация сроков экспериментальной отработки является предпосылкой сокращения сроков создания изделий РКТ. Понятие надежности, как критерия оптимальности программы отработки, включает в себя разнообразные требования. Это, прежде всего обеспечение заданной безотказности работы всех систем изделия в штатных условиях эксплуатации и в некоторых возможных нештатных ситуациях. Это также необходимая достоверность и точность экспериментального получения информации об основных параметрах системы, подтверждающих обеспечение достижения цели, поставленной перед создаваемым изделием.

Летные испытания являются заключительным этапом отработки изделий РКТ, в ходе которых, окончательно определяются основные характеристики изделия. Летные испытания проводятся с целью подтверждения заданных технических характеристик и надежности изделия, его составных частей и систем. В процессе летных испытаний реализуются те задачи экспериментальной отработки, которые по экономическим или каким-либо причинам не целесообразно проводить при наземной отработке. Обобщенная схема экспериментальной отработки представлена на рис. 3.1. Она включает следующие взаимосвязанные и взаимообусловленные этапы [1, 2, 3]:

- эксперимент, реализация которого подразумевает воспроизведение внешних и внутренних эксплуатационных факторов и определение путем наблюдений, измерений и ли вычислений количественных и качественных признаков свойств объекта испытаний;
- контроль, при котором происходит сравнение полученных в ходе эксперимента величин признаков (параметров) с их номинальными значениями;
- выяснение причин отклонения параметров объекта от номинальных значений или диагностирование, для реализации которого нужно было проводить эксперимент и осуществлять контроль. Совокупность эксперимента, контроля и диагностики определяет суть термина испытания;
- устранение причин выявленных отклонений путем выработки корректирующих мероприятий и доработки объекта испытаний на стадии проектирования,

совершенствования технологии его изготовления, методики использования по назначению в процессе эксплуатации.

Органическая совокупность эксперимента, контроля, диагностики и комплекса мероприятий по устранению причин, выявленных в ходе эксперимента отклонений, определяет суть экспериментальной отработки

С позиций теории автоматического управления реализация корректирующих мероприятий может рассматриваться как соответствующие обратные связи в замкнутой, многоконтурной системе управления качеством объекта по заданным показателям на различных этапах жизненного цикла объекта испытаний. Объектом управления при этом является собственно объект экспериментальной отработки (объект испытаний). Управляющие воздействия в виде корректирующих мероприятий направлены на изменение проекта изделия, изменение технологии его изготовления, изменение методики технического обслуживания в процессе эксплуатации. С другой стороны, схема экспериментальной отработки обладает признаками системы управления организационного типа, поскольку в основе успешности ее функционирования лежат вырабатываемые самой системой рекомендации (корректирующие мероприятия) на основе анализа статистической информации, направленные на совершенствование структуры различных уровней ее функционирования. Таким образом, экспериментальная отработка — это экспериментальная проверка заданной конструктором совокупности свойств объекта проявляемых в необходимых условиях его функционирования, и доработка конструкции и технологии изготовления объекта с целью обеспечения заданной совокупности его свойств, определяющих конечном итоге его высокое потребительское качество.

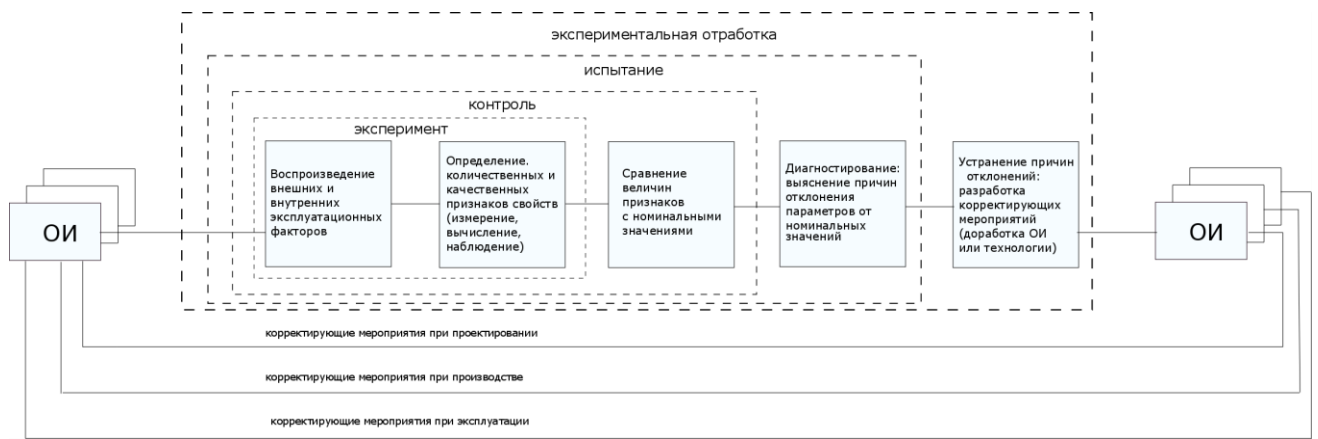


Рисунок 3.1. Обобщенная схема экспериментальной отработки

3. Классификация воздействий, оказывающих влияние на изделия РКТ в процессе эксплуатации

Воздействия, оказывающие влияния на изделия в процессе эксплуатации, разделяют на внутренние и внешние воздействия. Внутренние возмущающие факторы определяются процессами функционирования самого изделия. Применительно к летательным аппаратам это могут быть процессы тепловыделения работающей силовой установки и бортовых систем, несбалансированность быстровращающихся масс, переходные процессы в бортовых системах, пульсации давления в трубопроводах, изменение центровки вследствие несовершенства работы топливной системы и т.п. Внешние воздействия, в свою очередь, можно разделить на: температурные воздействия; воздействия климатических факторов, механических, биологических факторов, космических факторов в естественных условиях и в условиях применения.

Таблица 4.1. Климатические факторы и результаты их воздействия

Климатические факторы	Результаты воздействия
Высокая температура	Изменение, индуктивности, емкостного и удельного сопротивления, диэлектрической проницаемости. Разрушение движущихся частей из-за размягчения и разбухания термоизоляционных материалов. Старение

	материалов. Ускорение процесса окисления и течения некоторых других химических реакций. Изменение вязкости смазок.
Низкая температура	Уменьшение эластичности смолы и каучука. Изменение диэлектрической проницаемости. Замерзание жидкостей. Изменение вязкости смазок, приводящее к их желеобразному состоянию. Увеличение потерь тепла. Образование трещин на поверхностях. Структурная перегрузка из-за расширения материалов.
Влажность	Проникновение влаги в пористые материалы, что вызывает их увеличение в объеме, окисление материалов с хорошей электропроводимостью. Низкая влажность приводит к повышению хрупкости материалов, их гранулированию.
Соляной туман	Удельная проводимость солевого раствора уменьшает удельное сопротивление изоляционных материалов и способствует электролитическому травлению и химической коррозии металлов.
Осадки (роса, иней, дождь, снег, дождь со снегом)	Деградация и разрушение структуры материала, коррозия, повреждение электрических частей, утечка тепла
Солнечная радиация	Образование озона, изменение цвета материалов, резина теряет эластичность, увеличение температуры, ускоренное старение.

Высокое или низкое давление	Разрыв материалов, пробой изоляции, взрывы, разрушение структуры материалов. Изменение электрических характеристик. Сбой в работе приборов.
-----------------------------	---

К климатическим факторам относят: высокую и низкую температуру, влажность, соляной туман, различные виды атмосферных осадков, солнечную радиацию, высокое и низкое атмосферное давление. Климатические факторы и результаты их возможного воздействия на материалы, элементы, узлы и системы изделий РКТ приведены в таблице. Статистические данные по эксплуатации широкого класса технических систем в условиях воздействия климатических факторов, агрессивных сред и вибрации свидетельствуют о том, что более 60% случаев возникновения отказов связаны с воздействием таких климатических факторов, как температура и влажность.

При проведении климатических испытаний в сфере электрического и электронного оборудования наиболее широкое использование находят международные стандарты: Международной электротехнической комиссии (IEC) (МЭК) и стандарты США MIL (military – военный), созданные для испытания закупаемого США военного оборудования и оружия. Сегодня эти стандарты применяются не только в области оценки качества военной продукции, но и широко используются как в США, так и во всем мире при испытании разнообразного оборудования. В частности, стандарт MIL-STD-810E регламентирует методы проведения испытаний на воздействие следующих климатических факторов: низкое давление, высокое давление, низкая температура, тепловой удар, солнечная радиация, дождь и влажность. В общероссийском классификаторе стандартов насчитывается 52 стандарта, регламентирующие различные виды климатических испытаний.

В соответствии с видом испытаний механические воздействия разделяют на:

- разрушающие и неразрушающие;
- на прочность, разрушение;
- на критическую нагрузку;
- на разрыв;
- на сжатие и изгиб;
 - на кручение;
- на излом;
- на сдвиг;
- на удар;
- на воздействие вибрации (гармонической, случайной, стохастической, негармонической);
- на центробежные нагрузки или линейны ускорения;
- испытание на прочность и жесткость.

Биологические воздействия разделяют на:

- механические макроразрушения при возможном контакте, последствием которых могут быть:

столкновение – олени, лоси, люди, птицы и т.д.;

прогрызание – мыши, термиты;

уничтожение;

- ухудшение эксплуатационных свойств в результате биозагрязнения, биозасорения, биообрастания (плесень, мох, растения);

- биохимическое разрушение в следствии:

биологические повреждения в процессе питания – грибы;

химическое воздействие веществ, выделяющихся в процессе жизнедеятельности биологических объектов (плесень выделяет органическую кислоту, водород);

физико-химическая коррозия на границе материал-организм, плесень, грызуны, микроорганизмы, вирусы и бактерии.

При оценке опасности биовоздействий на объекты РКТ необходимо учитывать хорошую приспособляемость микроорганизмов к изменениям параметров окружающей среды, разнонаправленное влияние на их рост

температуры, влажности, давления, кислотности и других факторов окружающей среды. Наиболее сильное влияние на рост организмов оказывает температура. Размеры организмов также существенно влияют на их активность. Увеличение отношения поверхности к объему у микроорганизмов обуславливает высокую скорость протекания реакций, т.е. интенсивность обмена веществ и роста.

По отношению к использованию воздуха для выработки клеточной энергии различают аэробные (основными являются окислительные реакции, в которых акцептор водорода – кислород) и анаэробные (без свободного кислорода) условия жизни и развития организмов.

Бактерии – самая многочисленная и распространенная группа микроорганизмов, имеющих одноклеточное строение. Большинство видов бактерий существует за счет мертвых органических остатков.

Одной из важных для эксплуатации технических систем особенностей микроорганизмов является их способность к спорообразованию. Споры у бактерий образуются при неблагоприятных условиях существования (недостатке питательных веществ, высушивании, изменении показателя кислотности среды рН и т.д.). Образование спор у бактерий не связано с процессом размножения, а является приспособлением к выживанию в неблагоприятных условиях внешней среды. В тоже время споры могут приводить к изменению параметров материалов и изделий РКТ.

При испытаниях материалов, применяемых в производстве изделий РКТ, на микологических площадках, расположенных в различных климатических зонах Российской Федерации, за последние годы было выделено около 600 штаммов плесневых грибов, принадлежащих к 166 видам и 52 родам из классов фикомицетов, аскомицетов, базидиомицетов и несовершенных грибов. Родовой состав грибов, поражающих полимерные материалы в климатических районах России, приведен в приложении к ГОСТ 9.048–75 «Единая система защиты от коррозии и старения. Изделия технические. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов» [12].

Вредоносная деятельность микроорганизмов в основном связана с

выделением экзоферментов, продуктов метаболизма и органических и аминокислот. Наиболее агрессивными метаболитами микроорганизмов являются органические кислоты (известно около 30 органических кислот, синтезирующих плесневыми грибами), окислительно-восстановительные и гидролитические экзоферменты. Благодаря микроскопическим размерам, гифы и споры проникают в углубления и трещины материала, вызывая изменения массы, характеристик водопоглощения и степени гидрофобности. Обрастание микроорганизмами зависит от химического состава и строения материала, микрофлоры окружающей среды, наличия загрязнений (органических и неорганических) в воздухе, климатических условий и избирательности действия сообществ организмов.

Поверхностное воздействие плесневых грибов за счет конденсирования влаги и повышения температуры среды приводит к коротким замыканиям между токоведущими проводниками печатных плат. Органические кислоты и другие метаболиты обладают высокой проводимостью. В результате снижаются удельные объемное и поверхностное сопротивления, увеличивается $\text{tg}\delta$, уменьшаются пределы механической прочности материалов на растяжение и изгиб. Обрастание микроорганизмами сплавов свинца, алюминия и стали ведет к интенсивному растворению зерен металлов. Оптические изделия из стекла подвергаются разрушению плесневыми грибами из-за растворения продуктами метаболитов. Рост плесневых грибов лучше идет на нейтральных стеклах (например, кварцевом) и хуже на стеклах с щелочной реакцией. Даже умеренный рост микроорганизмов представляет серьезную проблему, так как снижает контрастность изображения, создает нежелательное рассеивание света. Споры попадают на стекла при сборке оптических приборов. Обработка печатных плат продуктами метаболизма в 10–12 раз снижает тангенс угла диэлектрических потерь. Действие аспергиллов и пенициллинов увеличивает на несколько порядков переходное сопротивление контактов и на 20... 30 % – контактное сопротивление у кабельных изделий.

Углеродистые стали разрушаются сульфатредуцирующими бактериями. Так же действуют на сталь и тионовые бактерии. Силикатные бактерии

разлагают алюмосиликаты: слюду, калиевое стекло, превращая калий в воднорастворимые соединения.

Повышенное внимание к роли и месту биологически воздействий на изделия РКТ обусловлено процессами глобализации в мировой экономике и как следствие, расширением ареала расположения космодромов, на которых используются отечественные средства выведения полезной нагрузки в космическое пространство (морской старт, космодром Куру во французской Гвиане и т.п.).

Наиболее существенными факторами, оказывающими влияние на изделия РКТ в процессе их пребывания в космическом пространстве, являются: глубокий вакуум, невесомость, температура (чаще сверхнизкая), электромагнитные и корпускулярные излучения, наличие метеорных частиц, магнитных и гравитационных полей планет и звезд, перепад температур на солнечной и теневой стороне орбиты, захлапленность околоземного космического пространства продуктами жизнедеятельности орбитальных космических станций, фрагментами искусственных спутников Земли и т.д.

Воздействие указанных факторов космического пространства на конструкционные материалы и элементы изделий РКТ происходит на фоне определяющего фактора – давления глубокого космического вакуума, обусловленного сильной разреженностью среды. Глубокий вакуум характеризуется длиной свободного пробега молекул газа, соизмеримой с характеристическими линейными размерами объектов РКТ или испытательной вакуумной камеры [12].

При изучении параметров космических условий условно выделяют три среды: межзвездную, межпланетную, атмосферу планет и их спутников. Межзвездная среда состоит из межзвездного газа и мельчайших твердых частиц – пыли, заполняющих пространство между звездами в галактиках. Газ почти равномерно перемешан с пылью. Межзвездная среда вблизи Солнца переходит в межпланетную среду. Межпланетная среда заполняет пространство между планетами Солнечной системы. Она состоит из расширяющегося вещества

солнечной короны (примерно 90 % составляют ионизированные атомы водорода и около 9 % – атомы гелия).

4. Физические основы влияния факторов космического пространства на состояние и работоспособность изделий РКТ

Для этапов и использования РКТ по назначению и технической эксплуатации в процессе полета можно выделить следующие характерные стадии: пребывание в земных условиях, включая условия на стартовой позиции; выведение на орбиту с заданными параметрами; пребывание в космосе и использование по назначению; торможение и спуск в атмосфере планеты назначения.

При нахождении изделий РКТ в земных условиях на них воздействуют климатические факторы. К ним относятся: - повышенная и пониженная температура окружающей атмосферы, которая может изменяться в пределах от -65°C до $+75^{\circ}\text{C}$; - повышенная или пониженная влажность окружающей атмосферы; - атмосферное давление и резкие изменения этого давления (бароудары); - дождь, град, роса, иней, снег; - атмосферная пыль и песок. В целом климатические факторы существенны лишь для изделий РКТ многоразового использования. Для обычных КА, выводимых в космос под обтекателем, на всех стадиях подготовки к запуску, включая и доставку на полигон и нахождение в монтажно-испытательном корпусе, принимаются меры по исключению влияния на них климатических факторов. Климатические испытания могут проводиться лишь для некоторых агрегатов и приборов КА, исходя из особенностей доставки их к местам установки на средстве доставки в космическое пространство.

Во время выведения изделия РКТ на околоземную орбиту на элементы конструкции, системы и оборудование действуют инерционные нагрузки, обусловленные ускорением. Величины этих нагрузок зависят от величины и направления перегрузок. Перегрузки, возникающие на участке выведения пилотируемых аппаратов, невелики и не превышают $7g$. Однако инерционные

нагрузки для отдельных элементов и даже частей конструкции изделия РКТ могут быть значительно выше из-за вибрации. Основным источником вибрации являются работающие двигатели – маршевые и двигатели системы ориентации. Вибрации могут порождать вращающиеся части силовых установок и исполнительных элементов гироскопических систем ориентации (гиродинов). Это происходит при несовпадениях центров тяжести вращающихся частей с осями, относительно которых происходит вращение. Причиной отмеченного несовпадения могут быть ошибки проектирования, погрешности изготовления и сборки, изменения размеров деталей из-за влияния температуры и пр. Вибрации отдельных элементов могут возникать также вследствие пульсации компонентов топлива и рабочих тел приводов в соответствующих трубопроводах. Причиной вибраций может быть конечная жесткость и упругие свойства элементов конструкции средства выведения. Вибрация может явиться причиной усталостных разрушений элементов конструкции, механических повреждений приборов и аппаратуры, нарушения герметичности отсеков РКТ.

Элементы конструкции изделия РКТ при выведении на заданную орбиту подвергаются интенсивному акустическому воздействию. Акустическая нагрузка - это воздействие звукового (акустического) поля, возникающее при работе маршевых двигателей на активном участке траектории. Акустическая энергия, генерируемая реактивной струей двигателя, характеризуется частотным спектром, силой звука, уровнем звукового давления, продолжительностью воздействия и некоторыми другими параметрами. На образование акустического поля затрачивается до 1% кинетической энергии струи. Частотный спектр шума работающего двигателя, как правило, широкополосный и гладкий. В первом приближении он может быть аппроксимирован белым шумом. Однако, при некоторых компоновках многосопловых двигательных установок или при взаимодействии реактивных струй с элементами пускового устройства в гладком спектре шума появляются дискретные составляющие – выбросы на отдельных частотах, интенсивности которых иногда в 100 раз и более превосходят уровень интенсивности сплошного спектра белого шума [9]. Для объекта наибольшую опасность представляют дискретные составляющие, которые могут приводить к

его раскачке и даже разрушению, особенно при совпадении частоты составляющей с собственной частотой конструкции. Наиболее чувствительны к акустическим нагрузкам аппаратура и некоторые элементы системы управления. При работе двигательной установки шум возникает не только от реактивных струй, но и от вибраций, например, от вибраций сопла и трубопроводов, вызванных воздействием на них колебаний давления в пограничном слое, непосредственных вибраций двигателей из-за несбалансированности вращающихся элементов, деформаций крепежной арматуры и т. д. Однако эти источники вибрации невелики по амплитуде и имеют высокую частоту.

При нахождении изделий РКТ в космосе основными факторами космической среды, оказывающими существенное влияние на конструкции, системы, оборудование и приборы РКТ являются следующие.

1. Космический вакуум. Основной особенностью космоса как физической среды является чрезвычайная разреженность газообразной материи в нем, то такое его состояние называется вакуумом. Количественной характеристикой вакуума (когда давление газа значительно ниже атмосферного) служит абсолютное давление. В вакуумной технике давление выражается в следующих единицах: “торр”, «мм. ртутного столба», “Паскаль” (Па). Один “торр” соответствует давлению 1 мм. рт. ст. Давление 760 мм. рт. ст. соответствует $9,81 \cdot 10^4$ Н.м⁻² или $9,81 \cdot 10^4$ Па, поэтому $1 \text{ торр} \approx 1,29 \cdot 10^2 \text{ Па}$ [7]. Давление в космосе изменяется в широких пределах в зависимости от рассматриваемого пространства. Согласно астрономическим данным давление газа в межзвездном пространстве (в основном атомарного водорода) составляет приблизительно 10^{-16} торр.

Межпланетное пространство заполнено газовыми частицами в основном солнечного происхождения. Эти частицы эжектируются из солнечной короны, образуя потоки плазмы - солнечный ветер, состоящий, главным образом, из ионизированных водорода и гелия. В зависимости от солнечной активности, давление в среднем изменяется от 10^{-11} до 10^{-13} торр. Атмосфера Земли на высотах более 100 км неоднородна как в отношении химического состава, так и

по состоянию частиц. Так на высоте 100 км давление газа составляет приблизительно $3 \cdot 10^{-4}$ торр. При этом основные компоненты атмосферы - N^2 , O, N. На высоте 200 км давление составляет $1,5 \cdot 10^{-4}$ торр. На высоте 300 км давление газа не превышает величину $3 \cdot 10^{-7}$ торр, а на высоте 1000 км - $3 \cdot 10^{-10}$ торр [9].

Одной из важнейших характеристик состояния газа, зависящей от его давления, температуры и химического состава и определяющей характер и интенсивность протекания процессов переноса, является средняя длина свободного пробега молекулы (L_c). Оценки величины L_c , выполненные по формуле Сюзерленда для высот $H=150$ км $H=200$ км, показывают, что в первом случае величина L_c равна 20 м, а во втором - 100 м. Длина свободного пробега молекулы в околоземном космосе превышает характерные размеры типового КА. Данное обстоятельство обуславливает способность космического пространства поглощать в неограниченных количествах газы и пары, которые выделяются с поверхности КА. Так «потери» массы элементов РКТ в космосе определяются тем, что лишь весьма незначительная часть частиц, улетающих с поверхности КА, возвращаются обратно. Эта обуславливает непостоянство давления газа на различные части КА. Так давление на «носового» части КА может на несколько порядков превышает давление в его «хвостовой» части. Это происходит из-за того, что скорость КА существенно превосходит скорость теплового хаотического движения частиц в космосе. По этой причине и возникает кинетический нагрев «носовой» части его поверхности.

В результате имеет место неравномерное динамическое и тепловое воздействие разреженной космической газообразной материи на поверхность КА. При этом для низких орбит (до высот 200 км) непосредственное тепловое воздействие газовых частиц на некоторые поверхности весьма существенно. Этим воздействием можно пренебречь лишь при высоте орбиты более 300 км. Но при этом разреженная газовая материя космоса уже начиная с высот,

превышающих 100 км не является достаточно заметной теплопередающей средой, что необходимо учитывать при проведении испытаний высокоорбитальных объектов РКТ.

Космический вакуум может вызвать ускоренную сублимацию (испарение) поверхностных слоев материалов КА, приводящую к изменению их поверхностных свойств, в том числе к изменению радиационно-оптических характеристик. При этом для металлов за исключением кадмия Cd и цинка Zn вакуум не представляет особой опасности. Большинство неметаллических материалов в большой степени подвержены изменениям в вакууме, особенно материалы, содержащие легколетучие компоненты. Отмеченные изменения усугубляются одновременным (с вакуумом) воздействием жестких электромагнитных излучений и потоков заряженных частиц в основном солнечного происхождения. Особенно опасно испарение в вакууме для материалов, имеющих целевое назначение, например, для покрытий с определенными оптическими свойствами, для смазок трущихся частей (испарение смазки может привести к холодной сварке металлов), для работы оптической аппаратуры (вакуумное испарение покрытия оправы или бленды объектива может вызвать его помутнение). В вакууме в результате удаления защитных газовых, а также оксидных пленок может существенно увеличиться коэффициент трения между соприкасающимися поверхностями.

Необходимо также учитывать следующие явления, обусловленные космическим вакуумом: нагрузки от перепадов давления (внутри КА и снаружи); утечка хранящихся на борту КА газов; разгон истекающих и стравливаемых газов до предельных скоростей; переохлаждение поверхностей при стравливании криогенных компонентов. Нагрузка от перепадов давления в космосе довольно значительна, поскольку любое абсолютное давление в замкнутых объемах является избыточным. Причиной утечки газов в вакууме являются не только мельчайшие зазоры в арматуре и уплотнениях, но и диффузия газов непосредственно через стенки емкостей.

Истекающие в вакуум газы разгоняются до больших скоростей, поэтому порождают довольно значительные возмущающие силы, которые необходимо

компенсировать средствами ориентации. Переохлаждение конструкции при стравливании криогенных жидких компонентов происходит из-за отбора от этих элементов теплоты испарения и из-за расширения потока стравливаемого газа. Вакуум может вызвать возникновение токов утечки, разрядов, пробоев, а также других нежелательных электрофизических явлений при эксплуатации электронного и электротехнического оборудования объекта РКТ. Продукты испарения могут попадать на относительно более холодные участки неизолированных электрических цепей и вызвать появление токов утечки, тем самым нарушая режим работы электронных схем.

2. Радиационные свойства космического пространства. Характерной особенностью космоса является практическое отсутствие излучения по всем направлениям, находящимся за пределами телесных углов обзора Солнца и планет. По оценкам плотность потока падающего из космоса излучения на элемент поверхности, который в силу своей ориентации не подвергается воздействию излучения, исходящего от Солнца и планет, составляет величину, приблизительно равную 10^{-5} Вт/м². Такая плотность потока излучения свойственна абсолютно черному телу с температурой 4⁰ К [6]. Именно поэтому при характеристике космического пространства часто находят применение термин “холодный” космос. В условиях космоса излучение, испускаемое поверхностью КА, назад практически не возвращается, даже если это излучение испускается в сторону находящейся вблизи планеты. То есть космическое пространство можно считать идеальным поглотителем, поэтому говорят о “черноте” космического пространства.

3. Невесомость. Невесомость – состояние материального тела, при котором действующие на него внешние силы не вызывают взаимных давлений частиц друг на друга [1, 3]. Невесомость возникает при свободном движении тел в поле только одних гравитационных сил. Состояние невесомости порождает ряд проблем физического и биологического характера. Так одной из физических проблем, появившейся при организации космических полетов, является проблема работоспособности и, в частности, запуска двигательных установок, работающих на жидких, а особенно на криогенных компонентах. Переход в

невесомость сопровождается изменением условий и механизма теплообмена с участием жидкости и газа как теплопередающей среды. Принципиальным является отсутствие при невесомости естественной (гравитационной) конвекции, в то время как в наземных условиях гравитационная конвекция чаще всего имеет место и играет значительную роль в передаче энергии через газовую или жидкостную среду и, следовательно, в формировании теплового режима элементов объема или отсека, заполненного газом или жидкостью. Актуальность вопроса обусловлена тем, что результаты наземных экспериментальных исследований теплового режима изделий РКТ из-за влияния естественной конвекции могут в ряде случаев существенно отличаться от теплового режима при невесомости.

Большая группа проблем, возникающих при невесомости, касается ее биологического воздействия на живые организмы и прежде всего на человека. В невесомости центральная нервная система человека и рецепторы многих анализаторных систем (вестибулярного аппарата, мышечной системы, кровеносных сосудов и др.) находятся в необычных условиях функционирования, что приводит к изменению динамических характеристик человека-оператора, являющегося неотъемлемым компонентом полуавтоматических и директорных систем управления.

4. Электромагнитное и корпускулярное излучение Солнца. Основным источником солнечной энергии служит так называемая протон-протонная ядерная реакция, при которой из 4-х атомов водорода образуется один атом гелия. Ядерные реакции совершаются в центральной сверхплотной и сильно нагретой (приблизительно до $14 \cdot 10^6$ К) части Солнца. В этой зоне электромагнитное излучение зарождается в форме γ -квантов высоких энергий. Эти γ -кванты поглощаются атомами той части газа, которая расположена ближе к поверхности и где ядерные реакции из-за более низких температур и давлений невозможны. По мере перемещения к поверхности в результате многократного повторения процессов поглощения и излучения происходит трансформация γ -квантов в кванты рентгеновского, ультрафиолетового, видимого и инфракрасного излучения. От поверхности Солнца до зоны лучистого

равновесия простирается конвективная зона, в которой энергия переносится конвекцией. Видимая поверхность Солнца, называемая фотосферой, испускает практически всю приходящую к нам энергию электромагнитного излучения Солнца. Плотность потока исходящего от фотосферы излучения составляет приблизительно $64 \cdot 10^3$ квт/м², что соответствует радиационной температуре 5785 К.

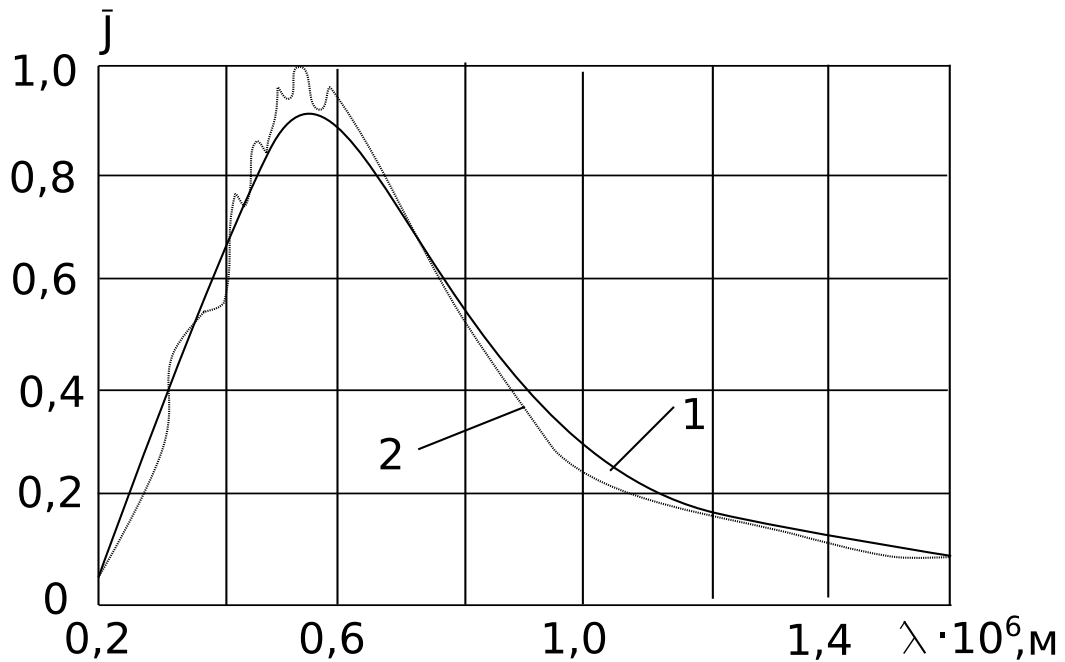


Рисунок 4.1. Зависимость от длины волны λ относительной величины спектральной плотности потока \bar{J} излучения Солнца (кривая 1) и абсолютно черного тела с температурой 5785 К (кривая 2).

Над фотосферой расположена солнечная атмосфера, внешняя часть которой, называемая короной, состоит из чрезвычайно разреженной плазмы с температурой, близкой к миллиону градусов. Хотя общее излучение короны приблизительно в миллион раз меньше общего излучения Солнца, именно она является источником интенсивного жесткого ультрафиолетового и рентгеновского излучения [9]. Излучение фотосферы и атмосферы изменяется во времени из-за так называемой солнечной активности.

На рисунке 4.1 представлена зависимость относительной величины спектральной плотности потока \bar{J} излучения Солнца от длины волны λ . Максимальное значение спектральной плотности при $\lambda=0,45$ мкм. На этом же рисунке пунктирной кривой 2 изображена аналогичная зависимость для

абсолютно черного тела с температурой 5785 К, равной радиационной температуре Солнца. Очевидно, что видимая (0,38 - 0,75) мкм и инфракрасная части спектров Солнца и абсолютно черного тела отличаются мало. В ультрафиолетовой области спектра наблюдаются существенные отличия. Большая часть энергии электромагнитного излучения Солнца сосредоточена в длинноволновой части спектра ($\lambda \geq 38,0$ мкм). Коротковолновая часть излучения ($\lambda \leq 0,38$ мкм) определяет коротковолновую радиацию (ультрафиолетовое и рентгеновское излучение), вызывающую деградацию наружных покрытий изделий РКТ и изменение их радиационно-оптических свойств. При этом спектр рентгеновского излучения существенно изменяется во время солнечных вспышек.

Кроме электромагнитного излучения Солнце постоянно испускает потоки заряженных частиц, представляющих собой главным образом ионы водорода, гелия, электроны. Эти потоки определяют понятием “солнечный ветер”. В результате взаимодействия этих частиц с геомагнитным полем возникает ударная волна. За ударной волной происходит захват заряженных частиц “солнечного ветра” магнитным полем Земли, что приводит к образованию зон захваченной радиации. Поток солнечного излучения, падающий на поверхность КА и поглощаемый ею в той или иной степени, может оказывать на эту поверхность двойственное воздействие: непосредственное тепловое и косвенное, проявляющееся со временем в виде возможного изменения радиационно-оптических характеристик поверхности. Изменение этих характеристик является результатом так называемых радиационных повреждений материалов, которые происходят в основном вследствие ионизации, смещения атомов вещества, диссоциации химических связей в молекулах.

5. Способы проведения испытаний

В настоящее время в лабораторных и стендовых испытаниях применяются следующие способы их проведения: последовательный, параллельный, последовательно-параллельный и комбинированный [1, 15].

При последовательном способе один и тот же объект испытания последовательно подвергается всем предусмотренным программой видам испытаний. Исключение составляют испытания, проводимые при воздействии большинства химических и биологических внешних воздействующих факторах. Эти испытания, как правило, проводятся на различных выборках. Последовательность испытаний предусматривает обычно первоочередное выявление наиболее грубых дефектов.

Важным обстоятельством при проведении последовательных испытаний является соблюдение установленной очередности воздействия внешних факторов. Иногда при составлении программы предусматривают такую последовательность внешних воздействующих факторов, согласно которой вначале действуют наиболее сильно влияющие на данный объект внешние факторы. Это делается для скорейшего выявления потенциально ненадежных образцов с целью сокращения времени испытаний. Однако при этом теряется большая часть информации о влиянии других видов факторов, которая могла быть получена при их действии. Поэтому чаще на практике рекомендуется начинать испытания с воздействия на объект испытаний наименее жестких внешних факторов, при которых воздействие будет наименьшим. Такой способ испытаний позволяет точнее определить причины наблюдаемых отказов и составить более полную картину о наличии в объекте испытаний потенциальных дефектов. С другой стороны, если наиболее опасные для объекта внешние воздействующие факторы расположить в конце последовательных испытаний, то значительно увеличивается время их проведения.

Установление единой последовательности проведения испытаний для различных изделий РКТ из-за значительно многообразия самих объектов, условий их эксплуатации и назначения практически не оправдано. Оптимальная последовательность проведения испытаний зависит от назначения изделия, предполагаемых условий эксплуатации, схемных и конструктивных особенностей и ряда других обстоятельств. Поэтому последовательность проведения испытаний для конкретного объекта указывается в технических

условиях или программе испытаний. В то же время рекомендуется, например, перед проверкой герметичности и влагоустойчивости проводить механические испытания, способные вызвать разгерметизацию конструкции. По этой причине климатические испытания целесообразно проводить после механических.

Характерной особенностью последовательного способа проведения испытаний является наличие эффекта накопления деградиционных изменений в физической структуре объекта испытаний по мере перехода от одного вида воздействующего фактора к другому, в результате чего каждое воздействие предыдущего фактора оказывает влияние на результаты испытаний при воздействии последующего, что, в свою очередь, усложняет интерпретацию результатов испытаний, увеличивает износ объекта испытаний, сокращает его ресурсные характеристики.

При параллельном способе проведения испытаний объект подвергается одновременному воздействию различных внешних воздействующих факторов одновременно (параллельно) на нескольких выборках. Такой способ позволяет получить большой объем информации за значительно более короткий промежуток времени при минимальном износе и расходе ресурса в процессе испытаний. В силу свойственного предприятиям аэрокосмической отрасли единичного и мелкосерийного производства параллельный способ испытаний находит ограниченное применение. Кроме того, его реализация требует существенно большего числа испытываемых изделий, чем при последовательном способе.

Компромиссным между последовательным и параллельным способами проведения испытаний является последовательно-параллельный способ, позволяющий в каждом конкретном случае более эффективно использовать преимущества того или иного способа, а также находить наилучшие варианты их сочетания. При последовательно-параллельном способе все изделия, отобранные для испытаний, разбиваются на несколько групп, которые испытываются параллельно. В каждой из групп испытания проводят последовательным способом. В данном случае все виды испытаний должны быть разбиты также на группы, число которых равно числу групп испытываемых изделий. По своему

составу группы испытаний формируются по видам испытаний из тех соображений, чтобы, с одной стороны, продолжительность испытаний во всех группах была примерно одинаковой, а с другой, чтобы условия проведения объединенных в одну группу видов испытаний были близки к реальным. В то же время испытания на грибоустойчивость, на длительное воздействие тепла, на воздействие солнечной радиации часто рекомендуется проводить на образцах, не подвергшихся другим видам механических и климатических воздействий.

Каждый из рассмотренных способов проведения испытаний предусматривает, как правило, отдельное воздействие на объект внешних факторов, что является существенным отличием от реальных условий его эксплуатации. Поскольку при лабораторных и стендовых испытаниях практически невозможно достоверно имитировать реальные условия эксплуатации объекта, то ограничиваются определенным комплексом стандартных испытаний. Не имитируя реальных условий эксплуатации, они позволяют получать информацию, необходимую для уверенности в том, что вновь разрабатываемые изделия будут обладать в эксплуатации не худшими характеристиками, чем предшествующие изделия.

С целью приближения лабораторных условий испытаний объекта к реальным условиям его эксплуатации все большее распространение начинает получать комбинированный способ испытаний, при котором на объект испытания одновременно воздействуют несколько внешних факторов. При этом следует учитывать то, что необходимость одновременного воспроизведения нескольких факторов в значительной степени усложняет процедуру испытаний, требует существенных затрат всевозможных ресурсов и затрудняет идентификацию истинных причин возникновения отказов. При испытаниях уникальных и мелкосерийных образцов изделий РКТ независимо от способа проведения испытаний необходимо точно фиксировать расход ресурсных характеристик изделий.

5. Статические и вибрационные испытания изделий РКТ

В процессе эксплуатации (на стартовой позиции, на участке выведения, в условиях космического полета, при спуске в атмосфере Земли или при посадке на другие планеты) изделия РКТ подвергается воздействию различных внешних механических нагрузок. Внешние силовые нагрузки с точки зрения влияния их на напряженно-деформированное состояние конструкции КА и на значения соответствующих внутренних усилий могут быть разделены на поверхностные и объемные (массовые). Поверхностные нагрузки распределяются на поверхности элементов конструкции и характеризуются давлением или значением равнодействующей силы. Массовые нагрузки распределяются по объему элементов конструкции и пропорциональны плотности их материала. Значения массовых нагрузок характеризуются коэффициентом перегрузки.

Основным источником массовых (инерционных) нагрузок для отдельных элементов и даже частей конструкции является вибрация. Все внешние поверхностные нагрузки подразделяются на квазистатические, медленно изменяющиеся по времени и называемые статическими, и на динамические, вызывающие упругие колебания конструкции. Эффект динамического действия внешних поверхностных сил, проявляющийся в виде возникновения упругих колебаний, зависит в основном от динамических характеристик объекта. Поэтому обычно в качестве критерия указанной классификации внешних нагрузок выбирают период (или частоту) свободных упругих колебаний конструкции. Если время изменения внешних поверхностных нагрузок велико по сравнению с периодом свободных упругих колебаний рассматриваемой конструкции, то эти нагрузки считаются статическими или квазистатическими. Если же время изменения внешних поверхностных нагрузок мало по сравнению с периодом свободных упругих колебаний – нагрузки относят к категории динамических. Таким образом, одна и та же внешняя нагрузка для одних конструкций может считаться квазистатической, а для других – динамической.

6.1. Статические испытания

Известные способы воспроизведения поверхностных нагрузок при статических испытаниях в большинстве случаев основаны на замене распределенных сил, действующих на конструкцию в натуральных условиях, системой элементарных сосредоточенных сил. Такие силы передаются на оболочки испытываемой конструкции при помощи парусиновых лямок с использованием рычажных систем. Усилия на рычажные системы передаются от нагружателей различного типа. Они могут быть: грузовые, на основе винтовых передач, на пневмо- и гидроцилиндрах. В тех случаях, когда объектом испытаний при комплексном воздействии силовых и тепловых нагрузок являются элементы тепловой защиты изделия РКТ, применяют вакуумные системы – так называемые вакуумные присоски, которые позволяют создать на поверхности конструкции распределенные нагрузки, или силовые системы с наддувом – резиновые мешки [21].

6.1.1. Нагружатели для статических испытаний

При проведении статических испытаний находят применение нагружатели на основе винтовой пары, на базе шариковинтовых и роликовинтовых передач, на базе электрогидравлических и электропневматических устройств [17].

При использовании винтовой пары, представленной на рис. 6.1, вращательное движение выходного вала электродвигателя, установленного на основании, с помощью пары винт-гайка преобразуется в поступательное движение гайки, которая соединена с исполнительным элементом нагружателя, который и создает нагружение на заданную точку объекта испытаний. Винт при этом приводится во вращение с помощью электродвигателя.

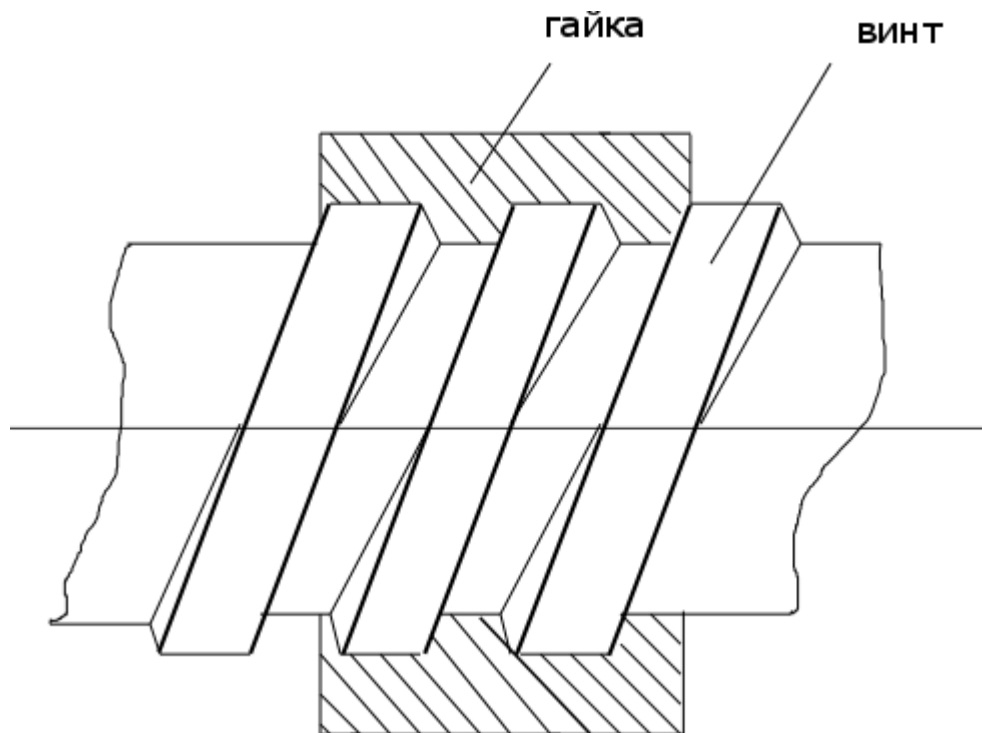


Рисунок 6.1. Винтовая пара.

Для создания сравнительно малых нагрузок, как правило, используют нагружатели с шариковинтовой парой (передачей) и электрическим приводом. Шариковинтовая передача (ШВП) – это линейный механический привод, преобразующий вращение в линейное перемещение и наоборот. Конструктивно она представляет собой длинный винт, по которому движется шариковая гайка. Внутри гайки между ее внутренней резьбой и резьбой винта по спиралевидной траектории катятся шарики, затем попадая в возвратные каналы – внутренние или внешние (рис. 6.2).

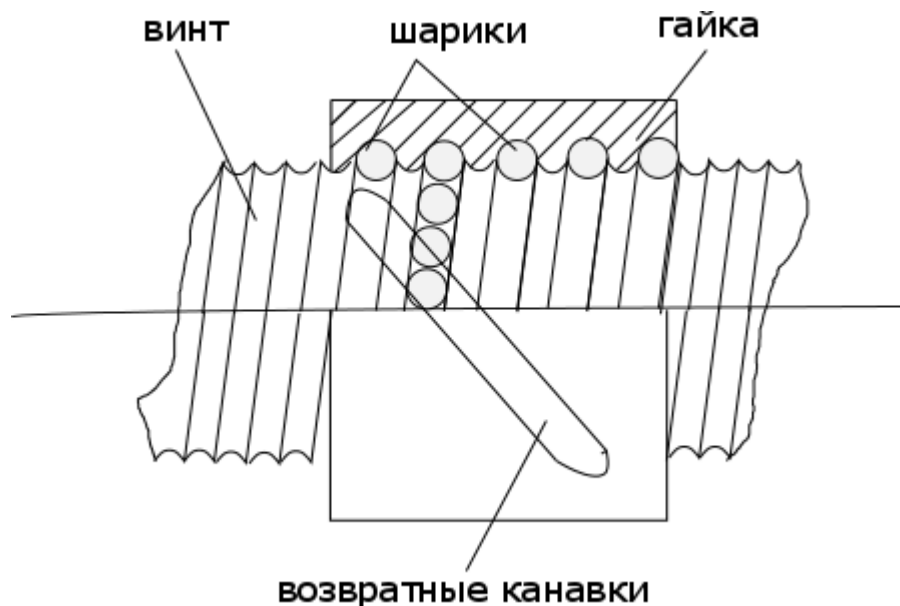


Рисунок 6.2. Шариковинтовая передача

Концы винта обычно закрепляются на подшипниковых опорах, а гайка соединена с перемещаемым узлом. При вращении винта с помощью электродвигателя происходит линейное перемещение гайки вместе с полезной нагрузкой вдоль винта. Существуют также ШВП с вращающейся гайкой – в такой конструкции винт линейно перемещается относительно гайки.

Недостатком традиционной винтовой передачи, состоящей из винта и гайки, является значительное трение скольжения, что приводит к рассеиванию в виде тепла до 70% энергии привода (электрического двигателя). Шариковинтовой привод содержит элементы качения (шарики), которые передают механическую энергию между гайкой и винтом. Это обеспечивает значительные преимущества ШВП по отношению к обычной винтовой передаче с трапецеидальной резьбой:

- ее КПД может превышать 80%, поэтому для создания одинаковых усилий требуемые мощность и крутящий момент приводных двигателей может быть намного меньше;
- интенсивность износа минимизирована;
- срок службы намного больше, чем у винтовых передач скольжения;
- меньший нагрев способствует возможности непрерывной и безотказной работы длительное время.

Однако из-за малого коэффициента трения для ШВП возможно «скатывание» (самопроизвольное перемещение гайки по винту без вращения последнего), особенно при большом шаге резьбы. Поэтому в некоторых случаях требуется использование тормозного устройства для предотвращения самопроизвольного движения механизма.

Диапазон изменения основных характеристик ШВП достаточно широк: номинальный диаметр винта – от 6 до 150 мм; динамическая грузоподъемность – от 1,9 до 375 кН; статическая грузоподъемность – от 2, 2 до 1250 кН; линейная скорость – до 110 м/мин [17].

Существуют два типа ШВП, различающихся технологией изготовления резьбового винта: катаные (накатка резьбы) и шлифованные (нарезка резьбы с последующей шлифовкой поверхности). Катаные винты проще в производстве, поэтому более доступны по стоимости. Шлифованные дороже, но имеют значительно лучшую точность изготовления резьбы, а, следовательно, точность и повторяемость позиционирования.

Дальнейшее развитие ШВП связано с заменой шариков роликами, что привело к созданию роликовинтовых и планетарных роликовинтовых передач (ПРВП). Роликовинтовая передача (РВП) представляет собой механизм преобразования вращательного движения в поступательное, аналогично тому, как это происходит в традиционных передачах типа ШВП или с трапецеидальной резьбой в винтовой передаче. Однако в отличие от этих устройств, РВП может выдерживать существенно большие нагрузки в течение тысяч часов эксплуатации в самых жестких условиях. В связи с этим роликовинтовая пара идеально подходит для ответственных применений с длительным непрерывным режимом работы, в частности при создании нагружателей для статических испытаний АРКТ. Планетарными передачами называются механические передачи вращения, некоторые элементы (ролики) которых не только вращаются относительно собственной оси, но и параллельно перемещаются в пространстве.

РВП характеризуются следующими параметрами:

- очень высокой грузоподъемностью (статическая нагрузка до 1000 тонн);

- динамическая нагрузка может достигать 200 тонн;
- очень высокой, до 3000 об/мин, допустимой скоростью вращения;
- очень высокими допустимыми ускорениями (7000 рад/сек²);
- долгим сроком службы даже при постоянной работе и высочайшей надежностью;
- хорошей сопротивляемостью агрессивным средам (пыль, песок, лёд), ударным нагрузкам и вибрациям;
- высокой точностью позиционирования рабочей поверхности.

Для создания больших усилий при проведении испытаний на статические нагрузки широкое распространение получили гидравлические нагружатели. В основе их работы лежат принципы функционирования электрогидравлических исполнительных элементов современных систем управления летательных аппаратов – электрогидравлических рулевых машин. Последние укрупненно состоят из золотникового устройства и рабочего (силового) цилиндра. По управляющим маломощным сигналам золотниковое устройство перераспределяет давления в полостях рабочего цилиндра. Это приводит к линейному перемещению поршня рабочего цилиндра и связанного с ним штока, который и прикладывает создаваемое усилие к объекту испытаний.

В случаях, когда использование гидравлических устройств нецелесообразно или невозможно, применяются нагружатели на основе пневматических устройств, которые работают аналогично гидравлическим.

При выборе того или иного типа нагружателя следует руководствоваться техническими и эксплуатационными параметрами. В таблице 6.1 приведены характеристики различных типов нагружателей, используемых при статических испытаниях изделий АРКТ.

Таблица 6.1. Технические и эксплуатационные параметры различных видов нагружателей

Параметры	РВП	Винты с трапецеидальной резьбой	ШВП	Гидравлика	Пневматика

Номинальная нагрузка	Высокая	Высокая	Высокая	Очень высокая	Высокая
Срок службы	Большой	Маленький, из-за высокого трения	Средний	Большой, при правильном техническом обслуживании	Большой, при правильном техническом обслуживании
Скорость	Высокая	Низкая	Средняя	Высокая	Высокая
Позиционирование	Простое	Среднее	Среднее	Сложное	Очень сложное
Жесткость	Очень высокая	Очень высокая	Средняя	Очень высокая	Очень низкая
Ударные нагрузки	Высокие	Высокие	Средние	Очень высокие	Высокие
Габариты	Минимальные	Средние	Средние	Большие	Большие
КПД	более 80 %	около 40%	более 70%	менее 50 %	менее 50 %
Установка	Совместима со стандартными преобразователями частоты	Требуется разработка механики системы	Требуется разработка механики системы	Сложная, требуется установка гидролиний, сервоклапанов, маслостанции и т.д.	Сложная, требуется установка пневмолиний, компрессорных станции и т.д.
Обслуживание	Очень простое	Сложное, вследствие сильного износа	Среднее	Очень сложное	Сложное
Воздействие на окружающую	Минимальное	Минимальное	Минимальное	Утечка гидравлической	Шум

ю среду				жидкости, шум	
---------	--	--	--	------------------	--

6.1.2. Тензометрические методы измерения деформаций при статических испытаниях изделий РКТ

Действие статических нагрузок приводит к упругим деформациям элементов конструкции объекта испытаний и изменению его напряженно-деформированного состояния (НДС). Для получения информации о НДС могут использоваться различные методы измерений: электротензометрические, оптико-геометрические, поляризационно-оптические, интерференционно-оптические, проникающих излучений. В качестве сенсоров перемещений элементов конструкции и деформаций используют преобразователи различного типа: механические, на поверхностных акустических волнах, оптико-механические, оптические, потенциометрические, емкостные, индукционно-трансформаторные, фотоэлектрические, струнные, механотронные, вихрековые, электроакустические, ультразвуковые, оптоэлектронные, пьезоэлектрические, магнитострикционные.

Наибольшее распространение практически во всех областях технической деятельности человека получили методы тензометрии – так называемые методы электрических измерений механических величин: деформаций, перемещений, сил, давлений, моментов, перегрузок, частот.

В основе метода лежит тензоэффект и применение тензорезисторов. Метод основан на измерении приращения электрического сопротивления материала проводника (полупроводника), деформируемого совместно с основанием, к которому он механически прикреплен. Сопротивление проводника R пропорционально его длине l и обратно пропорционально площади поперечного сечения F :

$$R = \frac{\rho l}{F},$$

где ρ – удельное сопротивление.

При малой деформации проводника $\frac{\Delta l}{l} = \varepsilon$ его сопротивление изменяется на величину $\frac{\Delta R}{R}$. Это явление и называют тензоэффектом, а коэффициент, связывающий относительное изменение сопротивления и деформацию, коэффициентом тензочувствительности материала

$$K_m = \frac{\Delta R}{(R\varepsilon)} = (1 + 2\mu) + m,$$

$$m = \frac{\Delta \rho}{(\rho\varepsilon)} = \nu E,$$

где m – коэффициент, зависящий от свойств материала и деформации; ν – продольный коэффициент пьезосопротивления; E – модуль упругости проволоки, фольги или полупроводника.

Для металлических тензочувствительных материалов величина K_m определяется в основном изменением геометрии проводника. В полупроводниках тензоэффект определяется тем кристаллографическим направлением, в котором вырезана пластина тензорезистора, а также существенно зависит от температуры. Величина тензоэффекта в полупроводниковых материалах в десятки раз выше, чем в металлических сплавах [17, 21].

В распоряжении пользователей имеется широкий спектр отечественных и зарубежных ТР, отличающихся технологий изготовления, конструкцией и габаритами ТР, возможными способами крепления к основанию.

Проводниковые ТР выполняют как на основе тонкой проволоки диаметром 2–30 мкм (проволочные тензорезисторы), так и на основе тонколистовой фольги толщиной 5–10 мкм (фольговые тензорезисторы). В зависимости от назначения и технологии производства проводниковые ТР выполняют на различной подложке (бумажной, пленочной, тканевой и др.). Для закрепления чувствительного элемента и выводных проводников на подложке и самого ТР на объекте применяют универсальные и специальные клеи, лаки, цементы, а также точечную сварку и пайку. Базовая длина ТР может

варьироваться от долей мм до 50 мм. Номинальный ряд сопротивлений включает следующие значения: 50, 100, 200, 400, 800 Ом [14].

Полупроводниковые тензорезисторы изготавливают из монокристаллов кремния, германия и других полупроводниковых материалов. Их практически мало используют в исследованиях НДС конструкций, но успешно и широко применяют в динамометрических устройствах в качестве преобразователей создаваемых сил. Благодаря новой технологии выращивания полупроводников на подложке из кремния или сапфира, являющихся почти идеальными упругими элементами, созданы интегральные полупроводниковые ТР. Методом диффузии получают сверхминиатюрные мосты и полумосты, монолитно связанные с упругим элементом. Для измерения статических деформаций используют мостовые схемы с питанием на переменном или постоянном токе, позволяющие осуществлять схемную термокомпенсацию влияния температуры окружающей среды на характеристики ТР. Наиболее универсальными являются цепи на постоянном токе.

6.1.3. Обобщенная структурная схема испытаний на статические нагрузки

Стенды для проведения испытаний крупногабаритных объектов АРКТ на статические нагружения проектируют в виде замкнутых пространственных рам, связанных с силовым полом, потолком и стенами лаборатории. Испытательный стенд в общем случае должен включать в свой состав: систему нагружения объекта испытаний, систему измерений НДС объекта, систему управления процессом испытаний. Одним из требований к системе испытаний является возможность приложения к объекту РКТ знакопеременных нагрузок. Управление многоканальными системами нагружения осуществляют с помощью ЭВМ, что позволяет проводить испытания объекта в строгом соответствии с установленной программой и методикой.

Обобщенная структурная схема испытаний на статические нагрузки приведена на рис. 6.3 [21]. Правая часть схемы составляет информационно-измерительную систему (ИИС), левая – управляющий вычислительный комплекс (УВК). Общим инструментом для выполнения всех операций является измерительно-вычислительный комплекс (ИВК), который выполняет измерения,

управляет процессами измерения и воздействия на объект испытаний, представляет в заданном виде результаты измерений и вычислений оператору. ИВК обеспечивает: восприятие, преобразование и обработку электрических сигналов от первичных преобразователей, управление средствами измерений и выработку нормированных электрических сигналов, являющихся входными для анализа точности измерений; контролирует величины силового воздействия на объект; представляет результаты в требуемом виде.

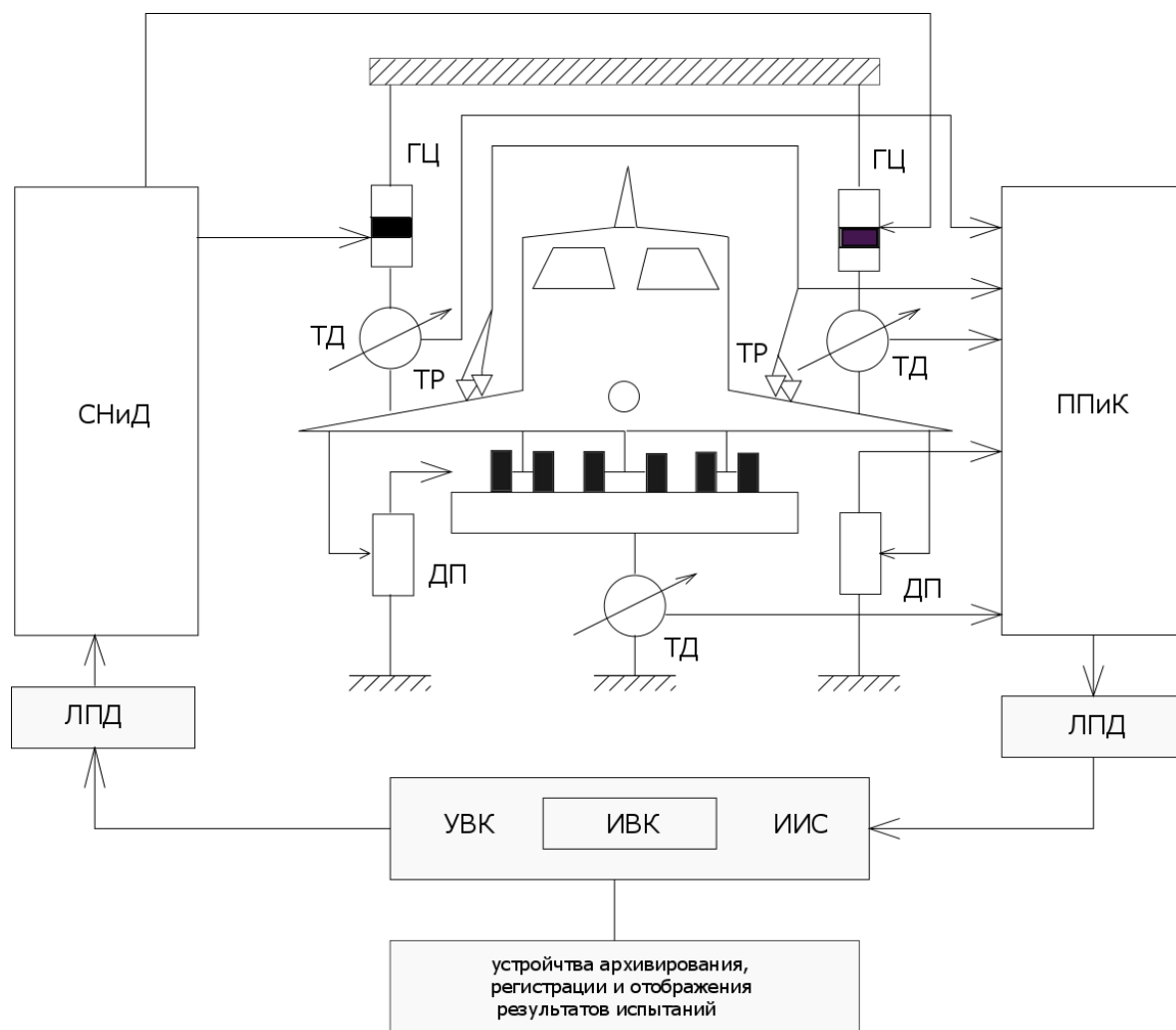


Рис. 6.3. Структура системы испытаний на статические нагрузки

СНиД – система нагружения и движения; ППиК – первичные преобразователи и коммутаторы; ЛПД – каналы связи и управления; УАРИО – устройства архивирования, регистрации и отображения информации о результатах испытаний; ТД – тензодинамометры; ДП – датчики перемещения; ТР – тензорезисторы; ГЦ – устройства нагружения.

В ходе испытаний к объекту с помощью комплекса нагрузателей ГЦ прикалываются заданные статические нагрузки. Их величина контролируется с помощью тензодинамометров ТД. Под действием нагрузок происходит изменение НДС объекта испытаний, которое проявляется в виде перемещений и деформаций отдельных точек, узлов и элементов конструкции объекта испытаний. Отмеченные перемещения и деформации измеряются сенсорами измерительной системы, в частности, датчиками перемещений ДП и тензорезисторами ТР. Выходные сигналы ДП и ТР, а также сигналы ТД поступают на устройства архивирования, регистрации и отображения информации о процессе испытаний. Эти же сигналы поступают в СНИД для осуществления управления процессом проведения испытаний, а именно для изменения величин создаваемых нагрузок и изменения пространственной ориентации объекта испытаний по отношению к нагрузателям. Передача информации от ППК в ИВК, а также от ИВК в СНИД осуществляется по линиям связи и каналам передачи данных ЛПД, которые могут быть в том числе и беспроводными.

6.1.4. Система статических испытаний авиационного двигателя пятого поколения ПД-14 АО «ОДК-Пермские моторы» в состав АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» [23]

При создании новейших образцов авиационной техники одним из важнейших видов испытаний был и остаётся анализ напряжённо-деформированного состояния конструктивных элементов, узлов и агрегатов. До настоящего времени в большинстве эксплуатируемых стендов статических испытаний в качестве нагрузателей применяются системы, построенные на гидравлическом или пневматическом принципе передачи усилия. В 2013 году научно-производственное предприятие (НПП) «Мера» в составе акционерного общества «Объединенная двигателестроительная корпорация» ввело в эксплуатацию систему статических испытаний перспективного авиационного двигателя пятого поколения ПД-14, в которой заложено принципиально иное решение по созданию нагружающего усилия: в качестве силовозбудителей

стенда статических испытаний перспективного двигателя было предложено использовать электромеханические нагрузатели на основе РВП.

Эта инновация была обусловлена необходимостью существенного повышения эффективности испытаний перспективной техники в целях обеспечения ее высокого качества.

Двигатель ПД-14 предназначен для российского перспективного магистрального самолета МС-21. Двигатель пятого поколения ПД-14 создается в широкой кооперации предприятий Объединенной двигателестроительной корпорации, главным разработчиком является АО «Авиадвигатель», главным серийным производителем – АО «ОДК-Пермские моторы». В АО «ОДК-Пермские моторы» в 2016 году практически закончена подготовка к производству в 2017 году перспективных двигателей [23].

В соответствии с требованиями заказчика система способна обеспечивать следующие виды нагружения: вертикальное, боковое, осевое, крутящие моменты. Эти нагрузки создаются системой силовозбудителей, развивающих усилия до 40 тонн. Погрешность задания усилия не превышает $\pm 1\%$ от номинальной величины при высокой точности позиционирования - до нескольких микрон. Поскольку одновременно к объекту прилагается воздействие нескольких силовозбудителей, важными факторами являются: сведение к минимуму их взаимовлияния в процессе работы, высокое быстродействие, возможность создания и повторяемость требуемого профилей нагружения.

Отказ от традиционных гидравлических нагрузателей при всех их достоинствах был обусловлен: необходимостью использования дополнительного оборудования (масляные баки и насосы, системы фильтрации масла, радиаторы для охлаждения, распределители и шланги для подачи и возврата рабочей жидкости, дроссели, клапаны, датчики, фитинги, втулки и уплотнения, поддоны); проблемами экологического характера в виде токсичности рабочей жидкости и загрязнения рабочего пространства

испытательного бокса; потенциальной пожароопасностью; существенными расходами на обслуживание системы гидравлических силовозбудителей.

Сравнительный анализ преимуществ и недостатков гидравлических и электромеханических нагружателей с РВП применительно к конкретному случаю с учетом требований представленных в программе испытаний конкретных изделий авиационной техники определил выбор именно электромеханических устройств. Внешний вид электромеханического нагружателя с планетарной РВП приведен на рис. 6.4 [17]. Такой нагружатель включает в свой состав электродвигатель, редуктор планетарного типа и собственно РВП.

Структура стенда статических испытаний НПП «Мера» аналогична обобщенной структуре, приведенной на рис.6.3. Она включает в свой состав систему нагружения, информационно-измерительную систему на базе ЭВМ и сенсоров деформаций и перемещений, устройства архивации, регистрации и отображения результатов испытаний.



Рис. 6.4. Нагружатель на базе планетарной РВП

Система нагружения стенда статических испытаний обеспечивает задаваемое программой испытаний силовое воздействие на конструкцию испытываемого объекта, контроль и управление процессом нагружения,

контроль параметров нагружения и передачу их значений в измерительную систему. Структурно система нагружения разделяется на элементы нагружения объекта испытаний и подсистему управления нагружением. Элементами нагружения являются «электроцилиндры» различного номинала на базе РВП. Подсистема управления нагружением включает в себя: частотные преобразователи; процессорный и измерительные модули на базе сети реального времени Ether CAT; тензорезисторные S-образные датчики сжатия-растяжения; промышленный компьютер и сетевое оборудование; программное обеспечение настройки режимов и контроля управления нагрузкой.

Реализованная отрицательная обратная связь в системе нагружения по сигналам тензорезисторных S-образных датчиков сжатия-растяжения, установленных между штоком электроцилиндра и объектом испытаний, позволяет обеспечить высокую точность нагружения объекта испытаний. Внешний вид системы нагружения стенда статических испытаний двигателя ПД-14 приведен на рис. 6.5.

На корпусах электроцилиндров также установлены концевые выключатели, определяющие границы перемещения штоков. Концевые выключатели подключены к схемам управления сервомоторами, и обеспечивают отключение питания «электроцилиндра» при достижении предельных положений штоков. Использование концевых выключателей позволяет обеспечить высокую безопасность персонала и сохранность объекта испытаний, гарантированную путем предотвращения нештатных ситуаций при задании задания нерегламентированных программой испытаний нагрузок.



Рис. 6.5. Система нагружения стенда статических испытаний (источник фото: Информационно-технический бюллетень АО «ОДК-Пермские моторы» (в 2013 г. предприятие носило название «Пермские авиационные двигатели») в составе АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», № 28, июль 2013 г.)

Система измерений стенда статических испытаний предназначена для измерения и регистрации следующих параметров в процессе проведения испытаний:

- параметров статического нагружения объекта испытаний, в том числе прикладываемых усилий;
- деформаций и перемещений нагружаемых узлов и деталей;
- механических напряжений элементов конструкции и деталей объекта испытаний.

Система измерений стенда осуществляет автоматизированный сбор, регистрацию, обработку и визуальное представление данных. Она

обеспечивает измерение статических деформаций по 1024 каналам, а также измерение абсолютных и относительных перемещений по 43 каналам. Измерение относительного напряжения тензорезисторов по полумостовой и мостовой схемам осуществляется с пределом основной приведённой погрешности $\pm 0,05$ %. Погрешность измерения перемещений не превышает $\pm 0,3$ % от измеряемой величины. Диапазон измерения перемещений составляет не более 25 мм. В ходе измерений предусматривается возможность наблюдения значений измеряемых параметров в реальном масштабе времени на семи автоматизированных рабочих местах (АРМ) операторов-испытателей.

ЭВМ измерительно-вычислительного комплекса помимо интеграции задач управления и обработки информации обеспечивает возможность расчёта различных параметров испытаний, в частности, нормальных и касательных напряжений по показаниям тензорезисторов. Выдача данных производится в табличной или графической форме. Возможно проведение линейного сглаживания и аппроксимации эмпирических данных по каждому измерительному каналу. Система испытаний реализована на принципах построения открытых систем, что позволяет при необходимости относительно просто модифицировать ее для статических испытаний других объектов и нарастить ее мощность. Для этого необходимо увеличить число силовозбудителей, количество используемых сенсоров НДС и оснастить систему дополнительным числом АРМ.

Система измерений стенда включает: подсистему измерения напряжений и деформаций; подсистему измерения линейных перемещений контактными датчиками; лазерную триангуляционную подсистему измерения линейных перемещений; подсистему измерения усилий, прикладываемых к объекту испытаний; систему видеорегистрации событий, происходящих на объекте и в зоне стенда в процессе подготовки и проведения испытаний. Видеорегистрация позволяет накапливать дополнительную информацию для выработки и принятия организационно-структурных решений, направленных

на совершенствование процессов экспериментальной отработки и, в конечном итоге, на повышение качества создаваемых объектов РКТ.

Основные технические характеристики системы измерений приведены в таблице 6.2.

Таблица 6.2. Основные технические характеристики системы измерений стенда статических испытаний авиадвигателя ПД-14

Параметр	Значение
Количество каналов измерения деформации тензорезисторами, шт.	1024
Количество каналов измерения перемещений контактными датчиками, шт.	20
Количество каналов измерения перемещений лазерными триангуляционными датчиками, шт.	23
Количество каналов измерения усилия, шт.	25
Диапазон изменения напряжения тензорезисторов, мВ	$\pm 5,0 \dots \pm 20$
Диапазоны измерения деформаций, мкм/м	± 4000 ± 16000
Диапазон измерения усилия, кгс	0 ... 50000
Диапазон измерения перемещений, мм	0 ... 25
Частота дискретизации каналов измерения перемещений, Гц	5
Частота дискретизации каналов измерения напряжения тензорезисторов, Гц/канал	6 ... 1024
Частота дискретизации каналов измерения усилия, Гц	100
Питание тензорезисторов, В	2,5; 5

Рабочий диапазон сопротивление тензорезисторов, Ом	100 ... 1000
Пределы основной приведённой погрешности измерения напряжения тензорезисторов, %	±0,3
Пределы основной приведённой погрешности измерения линейных перемещений, %	±0,5
Пределы основной приведённой погрешности измерения усилия, %	±0,5

6.2. Вибрационные испытания

Под вибрацией изделий РКТ понимают колебательные движения отдельных элементов конструкции. Основным источником вибрации являются работающие двигатели – маршевые и двигатели системы ориентации. Вибрации отдельных элементов могут возникать также вследствие пульсации компонентов топлива в трубопроводах. Могут быть и другие причины вибрации. Вибрация может явиться причиной усталостных разрушений элементов конструкции, механических повреждений приборов и аппаратуры, нарушения герметичности отсеков.

Целью вибрационных испытаний является оценка работоспособности изделий РКТ при вибрационных нагрузках. Основными задачами таких испытаний являются [1]:

- проверка прочности конструкции при экспериментально выявленных или расчетных вибрационных нагрузках и определение фактических запасов прочности;
- определение коэффициентов динамичности в узлах крепления комплектующих агрегатов;
- определение собственных частот и форм колебаний отдельных элементов конструкции и изделия в целом;

- определение коэффициентов демпфирования колебаний отдельных агрегатов и изделия РКТ в целом;
- оценка работоспособности комплектующих агрегатов, включая функционирующие агрегаты и кинематические узлы, после воздействия вибрационных нагрузок.
- проверка виброустойчивости комплектующих агрегатов;
- определение и оценка характеристик изделия в процессе и после воздействия вибрационных ускорений, а также при динамических возмущениях, создаваемых функционированием бортовой аппаратуры;
- определение характеристик объекта испытаний при имитации условий транспортировки.

При проведении виброиспытаний требуется обеспечить:

- рабочий диапазон частот вибрации в контрольных точках испытываемого объекта (низшие от 0 до 2 Гц, высокие от 500 до 2000 Гц);
- необходимую продолжительность испытаний, которая ограничивается испытательным ресурсом изделия (от нескольких десятков секунд до нескольких часов);
- настройку системы на заданный режим в установленное время (5 – 30 с);
- точность воспроизведения и поддержания заданных спектральных характеристик в ходе испытаний.

В ходе испытаний за короткое время необходимо воспроизвести заданные спектральные характеристики вибраций в широком диапазоне частот и с достаточно высокой точностью. Решение этой задачи для одномерных и в особенности для многомерных систем невозможно без применения автоматизированных систем управления виброиспытаниями.

Сам объект испытаний на воздействие вибраций должен отвечать следующим требованиям:

- весогабаритные, механические, электрические и прочие параметры испытываемого изделия должны быть идентичны параметрам реального объекта РКТ;

- масса, центровка и моменты инерции относительно трех ортогональных осей J_x , J_y и J_z изделия должны определяться экспериментально перед испытаниями для каждого конкретного объекта;
- замена отдельных элементов изделия массогабаритными макетами допустима лишь в том случае, если это не окажет влияния на прочность и работоспособность конструкции;
- в необходимых случаях следует обеспечить герметичность испытуемых изделий;
- аппаратура испытуемого изделия проверяется на автономное и комплексное функционирование с измерением основных параметров;
- комплектующие элементы и рабочие вещества, используемые в механизмах и агрегатах изделия, должны точно документации, необоснованные замены на стадии испытаний не допускаются;
- специальные узлы, устанавливаемые на изделия для его крепления или приложения нагрузки, не должны изменять прочность и жесткость конструкции, не должны препятствовать ее деформациям при испытаниях;
- изделие должно быть укомплектовано необходимым количеством сенсоров для измерений параметров испытаний и своего состояния.

Теоретически возможно проводить испытания всей конструкции КА, однако в большинстве случаев испытания проводятся на отдельных частях и системах изделия. Это обусловлено в основном следующими причинами. Для разных частей и агрегатов КА расчетными являются различные случаи нагружения. Проведение отдельных испытаний частей и агрегатов (поагрегатные испытания) позволяет использовать один экземпляр объекта. Испытания аппарата в целом сопряжено с большими техническими трудностями. Повторный эксперимент не гарантирует получение достоверной информации о прочности и жесткости объекта испытаний из-за остаточных деформаций, возникающих при предыдущем эксперименте.

6.2.1. Оборудование для проведения вибрационных испытаний.

Вибрационные испытания объектов РКТ и их отдельных фрагментов осуществляется с помощью специального оборудования. В состав этого оборудования входят: стенды, имитирующие вибрационные воздействия; приспособления для крепления объекта или его элементов к испытательным установкам; приборы для измерения параметров вибрации. Вибростенды можно классифицировать по назначению, исполнению, типу и направлению создаваемых колебаний, числу компонент и форме колебаний, принципу работы возбудителя, динамической схеме и принципу возбуждения переменной силы в возбудителе колебаний [14]. Если классифицировать вибростенды по принципу возбуждения переменной силы в возбудителе колебаний (по виду энергетического привода), то можно выделить следующие типы вибростендов: механические, электрогидравлические, пьезоэлектрические, электромагнитные, резонансные, пневматические, магнитострикционные, электродинамические.

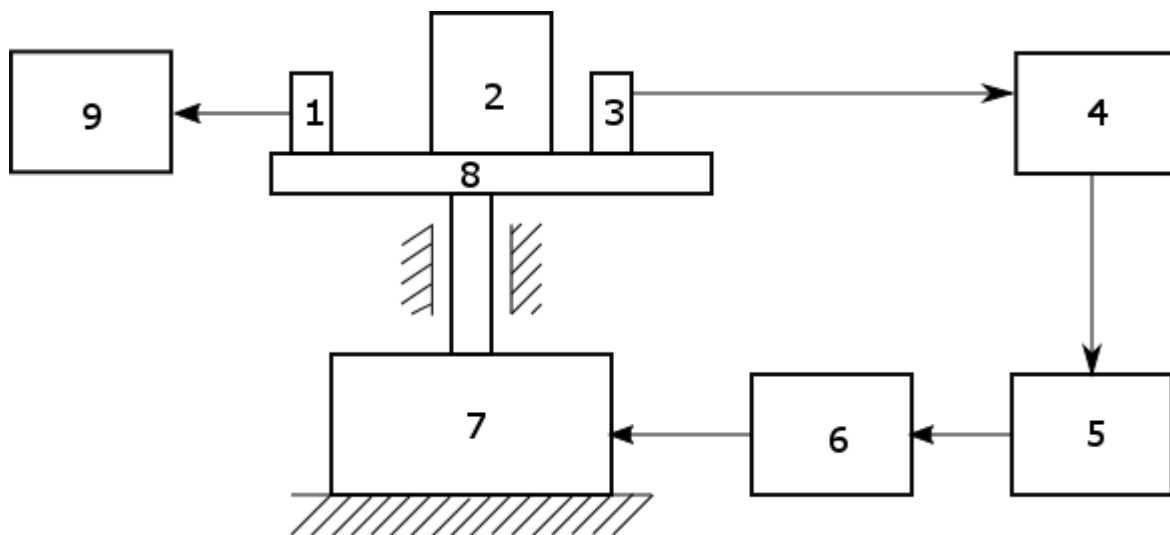


Рис. 6.6. Обобщенная схема вибростенда

Обобщенная схема вибростенда приведена на рис.6.6. Она включает: 1, 3 – измерительный и контрольный вибропреобразователи, 2 -объект испытаний, 4 – усилительно-преобразовательный блок, 5 – система управления вибростендом, 6 – усилитель мощности, 7 – возбудитель вибростенда, 7 - вибростол, 9 – устройство регистрации параметров вибрации.

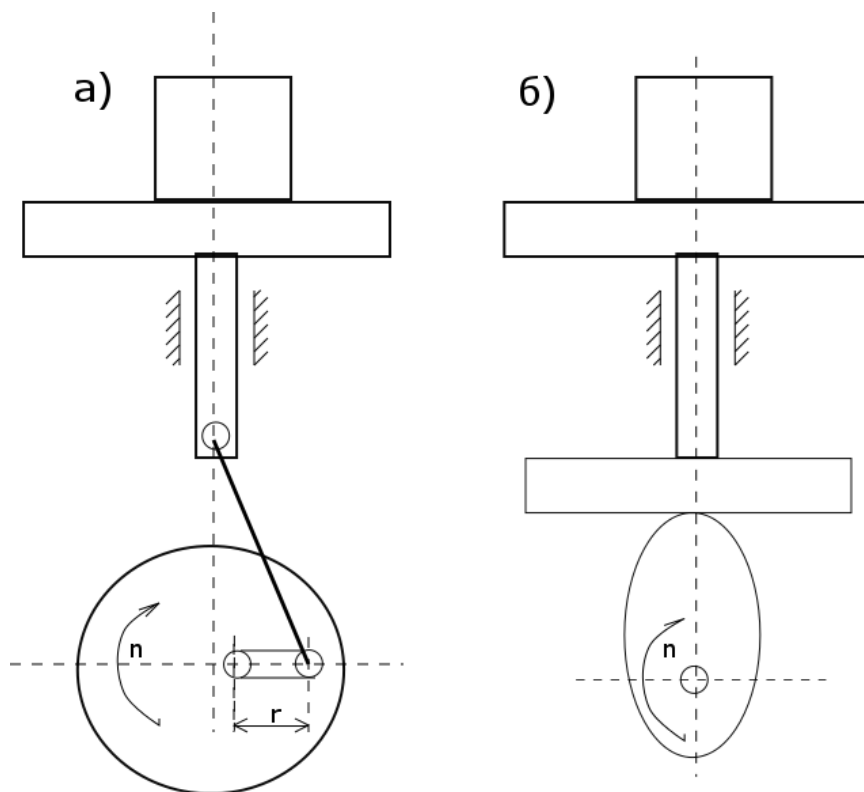


Рис. 6.7. Эксцентрикый (а) и кулачковый (б) возбудитель виброколебаний

Механические вибростенды обычно выполняются с вибровозбудителями следующего типа: центробежными, эксцентрикыми, кривошипно-шатунными, кулисными и маятниковыми. На рис. 6.7 изображена схема механического вибростенда с эксцентрикыйм (а) и кулачковыйм вибровозбудителем (б) соответственно. Такие стенды характеризуются простотой, но из-за сильной изнашиваемости подшипников применяются для частот, не превышающих 50-60 Гц. Амплитуда вибрации регулируется изменением эксцентриситета r , а частота вибраций – изменением частоты n вращения двигателя.

Основным преимуществом таких стендов является возможность получения очень низких частот, независимость амплитуды от частоты и экономичность. Недостатком является невозможность получения высоких частот и малых амплитуд (менее 0,1 мм) Для разгрузки подшипников применяются эксцентрикыйе стенды с упругими элементами в виде пружин, торсионов, рессор и реактивной массой. Реактивная масса служит для минимизации вибрационных сил, действующих на основание. Основное преимущество механических вибростендов заключается в том, что они обеспечивают с определенной точностью постоянство амплитуды вибрации при

частотах до 400 Гц. Грузоподъемность промышленных стендов может достигать значений до 1000 кг. Все механические стенды - низкочастотные. Частота ограничена прочностью звеньев передаточного механизма от привода (электродвигателя) до вибростола и тем, что многозвенный механизм таких стендов имеет большое количество резонансных частот, оказывающих влияние на режим испытания объектов.

В основе работы электрогидравлического возбудителя вибраций лежит принцип действия электрогидравлической рулевой машинки, в которой входной электрический сигнал вызывает перемещение поршня золотникового устройства. Золотниковое устройство вызывает перераспределение давления в полостях рабочего поршня, и он приходит в поступательное движение. Можно отметить следующие характерные особенности электрогидравлических вибростендов: возможность создания больших переменных сил (свыше 10^6 Н) и проведения испытаний при частотах до 100 Гц, а в отдельных случаях – при частотах до 500 Гц; возможность получения больших амплитуд перемещения при испытаниях на низких частотах.

Стенды с пьезоэлектрическим возбуждением вибрации предназначены в основном для испытания точных приборов, когда необходимая частота вибрации может превышать 10 кГц, амплитуда перемещения составляет доли микрометра, а величина возбуждающей колебания силы не превышает единиц ньютона. Работа таких стендов основана на способности пьезокристалла испытывать деформацию под действием приложенного к нему электрического напряжения. Изменение направления вектора напряженности внешнего электрического поля на противоположное меняет деформацию сжатия на деформацию растяжения или наоборот. Если напряженность электрического поля будет меняться по синусоидальному закону, то и деформация также будет происходить по синусоидальному закону. Частотный диапазон таких стендов составляет (1-20) кГц.

Работа электромагнитного вибростенда основана на взаимодействии электромагнита, установленного на упругом основании, с подвижной системой стенда, которая состоит из стола с испытуемым изделием и

упругих элементов, позволяющих осуществлять настройку на резонанс путем изменения их длины. Вибростенды с электромагнитным возбуждением имеют следующие особенности:

испытания проводятся на фиксированных частотах 50 и 100 Гц, но в отдельных конструкциях стендов возможны испытания с переменными частотами от 15 до 500 Гц;

возможна реализация значительных по величине вынуждающих сил (до $5 \cdot 10^4$ кН);

возможно проведение испытаний на резонансных режимах с переналадкой механической части стенда;

практически отсутствуют магнитные поля в зоне размещения испытуемого объекта;

конструкция стенда и система управления относительно просты.

Пневматические вибростенды - используют энергию сжатого воздуха от промышленных пневмосистем с давлением $2 \cdot 10^5 - 7 \cdot 10^5$ Па. В зависимости от реализованной в конструкции стенда принципиальной схемы вибровозбудителя возможно получение частот в диапазоне от 15 до 800 Гц при широком диапазоне изменения амплитуд колебаний и сил [21].

Резонансные (камертонные) вибростенды используются для получения высоких значений ускорений. Резонансные возбудители колебаний представляют собой балки или камертоны, колебания которых с резонансной частотой поддерживаются специальным электромагнитным устройством. Каждый из камертонов имеет собственные частоты. Идентичные испытываемые объекты симметрично крепятся на концах ветвей камертона, которые помещаются в магнитное поле торцевой системы возбуждения.

Электродинамические вибростенды применяются в тех случаях, когда при испытаниях необходимо обеспечить следующие условия:

большие амплитуды вынуждающей силы;

широкий частотный диапазон;

воспроизведение вибрации различного типа (гармонической, случайной, по заданной программе);

строгую направленность создаваемой вибрации;
возможность изменения направления вибрации;
слабые магнитные поля в зоне испытаний;
малый коэффициент нелинейных искажений.

В основе работы электродинамического возбудителя колебаний лежит взаимодействие поля катушки подмагничивания постоянного электромагнита, запитываемой постоянным током, с полем подвижной, соосно расположенной, катушки, подключенной к задающему генератору переменного тока. В результате взаимодействия постоянного и переменного магнитных полей возникает переменная сила, заставляющая всю подвижную систему, состоящую из подвижной катушки, штока, стола с объектом испытаний, совершать колебания в соответствии с направлением этой силы. Если по обмотке подвижной катушки пропускать синусоидальный ток, то колебания стола вибратора будут иметь синусоидальную форму. Частота колебаний стола определяется частотой тока от задающего генератора в подвижной катушке.

7. Испытания на воздействие инерционных нагрузок

Инерционные нагрузки возникают при движении изделия РКТ с ускорением. Величины инерционных нагрузок зависят от величины и направления перегрузок. Перегрузки возникают при выведении изделия на траекторию полета, при маневрировании, при торможении и при посадке на Землю или другие небесные тела. Перегрузки, возникающие на участке выведения, невелики и не превышают 7g. Однако при баллистическом торможении КА в плотных слоях атмосферы, особенно в тех случаях, когда угол входа КА в атмосферу больше $(2,5-3)^{\circ}$, перегрузки резко возрастают и могут достигать (10-12) g. При испытаниях КА и их систем инерционные нагрузки моделируют таким образом, чтобы они достаточно точно соответствовали нагрузкам в условиях штатной эксплуатации КА. Однако полностью воссоздать условия эксплуатации на стендовом оборудовании практически невозможно. В условиях полета направление гравитационных сил чаще всего не соответствует направлению действия создаваемой в стендовых условиях перегрузки. Реально

речь может идти только о некоторой степени приближения к реальным условиям.

В качестве средств испытаний на практике используются центробежные стенды, которые строятся на базе центрифуги [3, 17]. Для достижения требуемых условий нагружения, максимально приближающихся к эксплуатационным, на центробежных стендах используются следующие приемы:

изменение частоты вращения стола динамической установки с исследуемым объектом;

обеспечение возможности поворота исследуемого объекта относительно стола динамической установки;

линейное перемещение объекта вдоль одной или нескольких пространственных осей относительно оси вращения поворотного стола динамической установки.

Обобщенная схема центробежного стенда приведена на рис. 7.1.

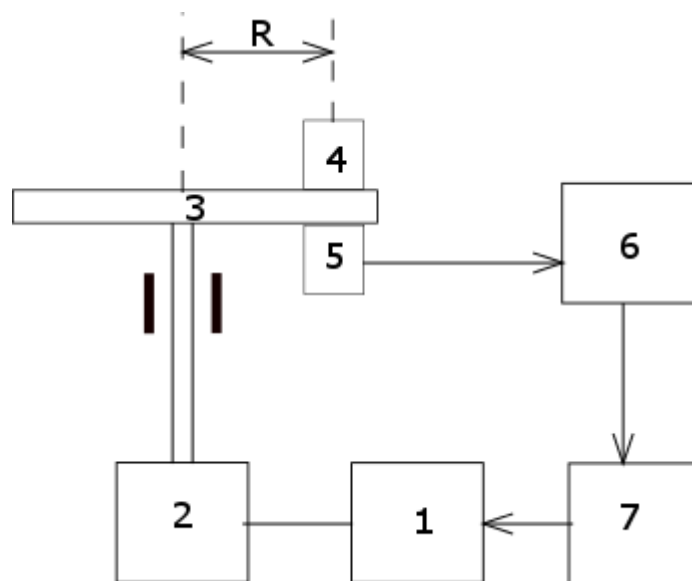


Рис. 7.1. Структурная схема центробежного стенда на базе центрифуги

Основными конструктивными элементами центробежного стенда являются электродвигатель 1, редуктор 2, платформа центрифуги 3, испытываемый объект 4, средство измерения линейного ускорения (акселерометр) 5, усилительно-преобразовательный блок 6, система регулирования скорости вращения центрифуги 7. Конструкция стенда должна обеспечивать возможность перемещать объект испытаний и изменять его

угловую ориентации относительно платформы. Для имитации инерционных нагрузок на центробежном стенде необходимо знать закон изменения во времени перегрузки, действующей на КА при эксплуатации. Величина линейного ускорения, создаваемого стендом, определяется произведением квадрата угловой скоростью вращения платформы на расстояние от места установки объекта испытаний до оси, вокруг которой происходит вращение платформы.

При воспроизведении линейных ускорений на центробежном стенде определяющее значение имеют: величина перегрузки, градиент перегрузки, предельный импульс перегрузки и мера ее интегрального воздействия. В процессе испытаний КА и их элементов на центробежных стендах воспроизводятся три основных вида перегрузок: - импульсные; - сложные непрерывные периодические; - непериодические ортогональные.

8. Испытания на воздействие ударных нагрузок

Ударом называют механическое воздействие материальных тел, приводящее к конечному изменению скоростей их точек за бесконечно малый промежуток времени. Ударное движение - движение, возникающее в результате однократного взаимодействия тела (среды) с рассматриваемой системой при условии, что наименьший период собственных колебаний системы или ее постоянная времени соизмеримы или больше времени взаимодействия. При ударном взаимодействии в рассматриваемых точках определяют ударные ускорения, скорость или перемещение. В совокупности такие воздействия и реакции называют ударными процессами. Различают одиночные, многократные и комплексные ударные воздействия. Одиночные и многократные ударные процессы могут воздействовать на аппарат в продольном, поперечном и любом промежуточном направлениях. Комплексные ударные нагрузки оказывают воздействие на объект в двух или трех взаимно перпендикулярных плоскостях одновременно. Ударные нагрузки могут быть как непериодическими, так и периодическими.

Возникновение ударных нагрузок связано с резким изменением ускорения, скорости или изменением направления перемещения объекта РКТ в

пространстве. Наиболее часто в реальных условиях встречается сложный одиночный ударный процесс, представляющий собой сочетание простого ударного импульса с наложенными колебаниями. К основным характеристикам ударного процесса относятся:

законы изменения во времени ударного ускорения, скорости и перемещения; длительность действия ударного ускорения - величина интервала времени от момента появления до момента исчезновения ударного ускорения;

длительность фронта ударного ускорения - интервала времени от момента появления ударного ускорения до момента, соответствующего его пиковому значению;

коэффициент наложенных колебаний ударного ускорения - отношение полной суммы абсолютных значений приращений между смежными и экстремальными значениями ударного ускорения к его удвоенному пиковому значению;

импульс ударного ускорения - интеграл от ударного ускорения за время, равное длительности его действия.

По форме кривой функциональной зависимости параметров движения ударные процессы разделяются на простые и сложные. Простые процессы не содержат высокочастотных составляющих и их характеристики аппроксимируются простыми аналитическими функциями. Класс функции определяется формой кривой, аппроксимирующей зависимость ускорения от времени - полусинусоидальная, косинусоидальная, прямоугольная, треугольная, пилообразная, трапецеидальная и т. п.

Механический удар сопровождается быстрым выделением энергии, в результате чего возникают местные упругие или пластические деформации, возбуждение волн напряжения и другие эффекты, приводящие иногда к нарушению функционирования и к разрушению конструкции изделия РКТ. Ударная нагрузка возбуждает быстрозатухающие собственные колебания. Значение перегрузки при ударе, характер и скорость распределения напряжений по конструкции определяются силой и продолжительностью удара, и характером изменения ускорения. Удар может вызвать механическое разрушение объекта. В зависимости от длительности, сложности ударного процесса и его

максимального ускорения при испытаниях определяют степень жесткости элементов конструкции КА. Простой удар может вызвать разрушение вследствие возникновения сильных, хотя и кратковременных перенапряжений в материале. Сложный удар может привести к накоплению микродеформаций усталостного характера. Так как конструкция изделий РКТ обладает резонансными свойствами, то даже простой удар может вызвать колебательную реакцию в ее элементах, также сопровождающуюся усталостными явлениями. Механические перегрузки вызывают деформацию и поломку деталей, ослабление соединений (сварных, резьбовых, заклепочных), перемещение механизмов и органов управления, в результате чего изменяется регулировка и настройка приборов и появляются другие неисправности.

Общая задача испытаний на воздействие ударных нагрузок состоит в проверке способности объекта и всех его элементов выполнять свои функции в процессе ударного воздействия и после него. При этом ставится целью максимально приблизить результаты испытательного удара к эффекту реального удара в натуральных условиях эксплуатации КА. При воспроизведении в условиях наземного эксперимента режимов ударного нагружения накладываются ограничения на форму импульса мгновенного ускорения как функции времени, а также на допустимые пределы отклонений формы импульса. Дело в том, что практически каждый ударный импульс на лабораторном стенде сопровождается пульсацией, являющейся следствием резонансных явлений в ударных установках и вспомогательном оборудовании. Так как спектр ударного импульса в основном является характеристикой разрушающего действия удара, то наложение даже небольшой пульсации может сделать результаты испытаний недостоверными.

Ударные стенды как правило состоят из следующих элементов: испытуемого объекта, закрепленного на платформе или в контейнере вместе с измерительным преобразователем - датчиком ударной перегрузки; средства разгона для сообщения объекту необходимой скорости; тормозного устройства; системы управления; регистрирующей аппаратуры для записей исследуемых параметров объекта и закона изменения ударной перегрузки; первичных

преобразователей; вспомогательных приборов для регулировки режимов функционирования испытываемого объекта; источников питания, необходимых для работы испытываемого объекта и регистрирующей аппаратуры [16]. Обобщенная схема ударного стенда приведена на Рис.8.1.

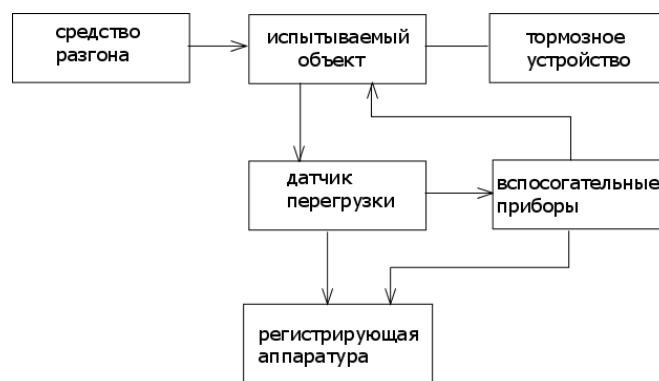


Рис. 8.1 Обобщенная схема ударного стенда

Испытательные стенды, которые реализуют отдельные удары, составляют специальный класс оборудования для механических испытаний. Ударные стенды могут быть классифицированы по следующим признакам:

- по принципу формирования ударного импульса (I);
- по характеру испытаний (II);
- по виду воспроизведения ударного нагружения (III);
- по принципу действия (IV);
- по источнику энергии (V).

Классификация ударных стендов по различным признакам приведена на рис. 8.2.



Рис.8.2 Классификация ударных стендов

Простейшим стендом для ударных испытаний является стенд, работающий по принципу сбрасывания закрепленного на каретке испытуемого объекта с некоторой высоты, т.е. использующий для разгона силы земного тяготения. При этом форма ударного импульса определяется материалом и формой соударяющихся поверхностей. На таких стендах можно обеспечить ускорение до $8 \cdot 10^4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$. Ударные перегрузки на таких стендах зависят от высоты падения H , жесткости тормозящих элементов k , суммарной массы стола и объекта испытаний M и характеризуются следующей зависимостью:

$$f_n = 125 \sqrt{\frac{180}{V}},$$

Подбирая соответствующим образом величины M , H и k , можно получать требуемые значения перегрузки. Имеются испытательные стенды, использующие гидравлический или пневматический привод для разгона каретки с испытуемым объектом. В качестве разгонного устройства могут быть использованы резиновые амортизаторы, пружины, а также линейные асинхронные двигатели.

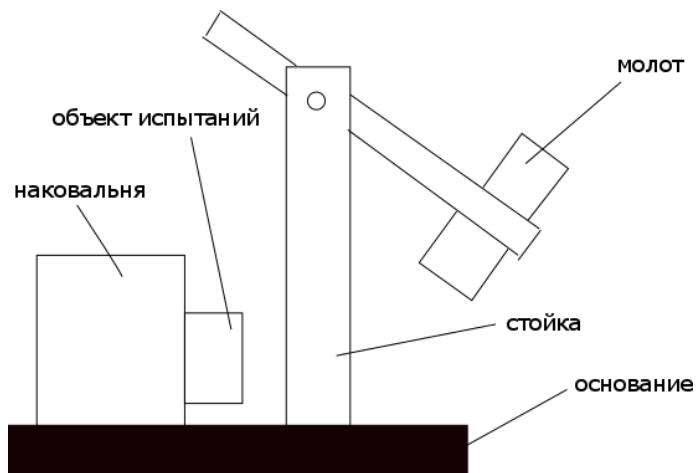


Рис. 8.3 Схема ударного стенда с маятниковым копром

В основе ударного стенда может использоваться и схема маятникового копра (рис.8.3), которая включает наковальню, молот на свободной подвеске и те или иные тормозные устройства [16]. Наковальня может как неподвижно располагаться на основании, так и иметь свободную подвеску. Параметры ударного импульса также определяются видом деформируемого элемента в зоне контакта молота и наковальни.

Возможности практически всех ударных стендов определяются конструкцией тормозных устройств. Варианты конструктивных исполнений тормозных устройств, заимствованные из [1, 2], приведены рис.8.4.

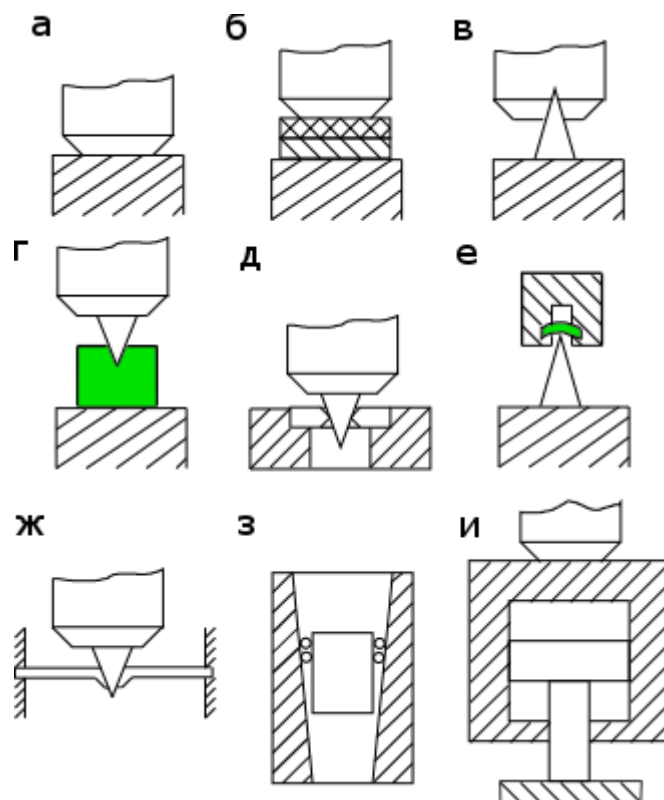


Рис.8.4. Тормозные устройства ударных стендов

Для получения больших перегрузок с малым фронтом их нарастания используется удар испытуемого объекта с жесткой плитой (рис. 8.4.а). Торможение при этом обеспечивают упругие силы в зоне контакта при ударе. Для получения перегрузок в широком диапазоне, от десятков до десятков тысяч единиц, с временем нарастания их от десятков микросекунд до нескольких миллисекунд применяют деформированные элементы в виде пластины или прокладки, лежащей на жестком основании. Соответствующие прокладки могут быть из стали, латуни, меди, свинца, резины и других материалов (рис. 8.4.б). Для обеспечения заданного закона изменения перегрузки и длительности воздействия ударного ускорения в небольшом диапазоне используют деформируемые элементы в виде наконечника различной формы, который устанавливается между плитой ударного стенда и испытуемым объектом (рис.8.4.в). Для воспроизведения удара с относительно большим путем торможения применяют тормозное устройство, состоящее из свинцовой деформируемой плиты, расположенной на жестком основании стенда, и внедряющегося в нее жесткого наконечника соответствующего профиля (рис.8.4.г), установленного на объекте или на платформе стенда. Такие устройства позволяют получать перегрузки в широком диапазоне с относительно небольшим временем их нарастания - до десятков миллисекунд. Для обеспечения торможения находят применение и такой упругий элемент как рессора (рис.8.4.д), которую располагают на подвижной части ударного стенда. Такой вид торможения обеспечивает получение относительно малых перегрузок полусинусоидальной формы с продолжительностью, измеряемой миллисекундами. Для получения относительно малых перегрузок применяется пробиваемая металлическая пластина, закрепленная по контуру в основании установки в сочетании с жестким наконечником (рис. 8.4.е). Для получения длительно действующих перегрузок с временем нарастания до десятков миллисекунд применяют деформируемые элементы, установленные на подвижной платформе стенда (рис. 8.4.ж), в сочетании с жестким коническим

уловителем. Тормозное устройство с деформированной шайбой (рис.8.4.з) позволяет получать большие пути торможения до (200- 300) мм при малых деформациях шайбы. Пневматическое тормозное устройство (рис.8.4.и) позволяет воспроизвести интенсивные ударные импульсы различной формы, при этом оно является многоразовым. В случае применения гидравлического амортизатора его шток погружается в жидкость. Жидкость выталкивается через очко штока по закону, определяемому профилем регулирующей иглы. Переменный профиль иглы позволяет реализовать различные законы торможения.

9. Испытания на воздействие акустических нагрузок.

Акустическая нагрузка - это воздействие звукового (акустического) поля на изделия РКТ, возникающее при работе маршевых двигателей на активном участке траектории движения. Акустическая энергия характеризуется частотным спектром, силой звука, уровнем звукового давления, продолжительностью воздействия и некоторыми другими параметрами. Сила звука, или интенсивность акустического излучения, определяется количеством энергии, переносимой через единицу площади площадки, перпендикулярной к направлению его распространения, в единицу времени. Для синусоидальной плоской волны сила звука определяется выражением

$$I = (\Delta p)^2 / (2\alpha\rho), \text{ вт/м}^2,$$

где Δp - амплитуда переменного звукового давления, ρ - средняя плотность среды, α - скорость звука в данной среде. В соответствии с законом Вебера-Фехнера прирост силы ощущения звука человеческим ухом пропорционален логарифму отношения энергий двух сравниваемых раздражителей. Уровень звукового давления L выражают в децибелах и относят к пределу слышимости:

$$L = 10 \cdot \lg(I/I_0) = 10 \cdot \lg(\Delta p^2 / \Delta p_0^2), \text{ дб.}$$

В реальных условиях на образование акустического поля затрачивается до 1 % кинетической энергии струи выхлопных газов двигательной установки. Частотный спектр шума работающего двигателя, как правило, широкополосный и гладкий, в силу чего может быть аппроксимирован белым шумом. Для ряда компоновочных схем двигательных установок или при взаимодействии

реактивных струй с элементами пускового устройства в спектре белого шума могут появляться дискретные составляющие, интенсивности которых иногда в 100 раз и более превосходят уровень интенсивности сплошного спектра.

Для объекта РКТ наибольшую опасность представляют дискретные составляющие, которые могут приводить к его раскачке и даже разрушению, особенно при совпадении частоты колебаний среды с собственной частотой конструкции. Наиболее чувствительны к акустическим нагрузкам аппаратура и некоторые элементы системы управления. При работе двигательной установки шум возникает не только от реактивных струй, но и от вибраций. Могут вибрировать сопла и трубопроводы из-за воздействия на них колебаний давления в пограничном слое, из-за несбалансированности вращающихся элементов, упругой работы арматуры и т. д. Однако эти источники вибрации невелики по амплитуде и имеют высокую частоту. Наиболее опасными для объектов РКТ являются вибрации, возникающие в результате акустического воздействия.

Известные теоретические методы исследования акустического нагружения, к сожалению, не вполне надежны и не обеспечивают получение достоверных результатов. В частности, весьма затруднен и требует проведения экспериментальных исследований: учет дополнительных динамических нагрузок из-за акустических воздействий, учет влияния акустики на процессы теплообмена и нагрев криогенных жидкостей в баках, возникновение акустической кавитации жидкостей на входе в насосы двигателей.

Акустические испытания разделяют на натурные, проводимые непосредственно на изделии на открытом стенде с работающим двигателем, испытания в закрытых боксах с различными источниками шума, а также испытания в акустических камерах. Наземные натурные испытания позволяют наиболее полно приблизиться к эксплуатационным условиям и обеспечить полную проверку прочности конструкции и функционирования бортового оборудования. Такие испытания являются заключительными в общей программе отработки КА на акустические воздействия. Недостатком таких испытаний является их высокая стоимость, так как в течении всех испытаний двигателя,

генерирующие акустическое поле, должны работать на максимальной мощности. При этом в наземных условиях создать реальные полетные условия акустического нагружения практически невозможно.

Испытания на открытом стенде с работающим двигателем более экономичны. Ускорение испытаний и соблюдение требуемых уровней нагрузки в данном случае обеспечивается выбором положения испытываемых объектов относительно источника шума. Режимы испытаний устанавливаются на основе натуральных измерений звуковых нагрузок и деформаций в контрольных точках поверхности изделия.

Испытания в закрытых боксах позволяют получить более высокие уровни акустических нагрузок, чем на открытом стенде, в результате чего сокращается продолжительность испытаний. Недостатком этих испытаний является некоторое искажение звукового поля по сравнению с натурными условиями.

Испытания в специальных акустических камерах, где создаются условия, близкие к натурным, позволяют получить наиболее достоверную информацию о работоспособности испытываемого объекта. Однако объем этих камер ограничен, что не позволяет проводить испытания крупногабаритных объектов.

В ходе эксперимента испытываемые изделия располагают на монтажной раме вокруг струи из сопла реактивного двигателя. Для сброса газов за рабочим участком используют диффузор. Параметры звукового поля и реакции испытываемых объектов контролируют при помощи микрофонов и всевозможных сенсоров на корпусе изделия. Вблизи среза выхлопного сопла уровни шума составляют приблизительно 160 - 175 дБ. Такое интенсивное акустическое излучение реактивных струй связано с неоднородностью структуры турбулентного потока и может рассматриваться как результат взаимодействия нестационарных турбулентных вихрей. Следует отметить, что акустическую мощность W турбулентной струи определяют по формуле

$$W = \frac{k_0 \rho_c^2 v_c^2 D^2}{\rho_0 a_0^5},$$

где $k_0=1,5 \cdot 10^{-4}$; ρ_c - плотность среды в струе; v_c - скорость истечения газа из сопла двигателя; D - диаметр среза сопла; ρ_0 и α_0 - соответственно плотность окружающей среды и скорость распространения звука в окружающей среде.

Схема закрытого бокса, входящего в состав так называемой реверберационной камеры, изображена на рисунке 9.1 [2, 11].

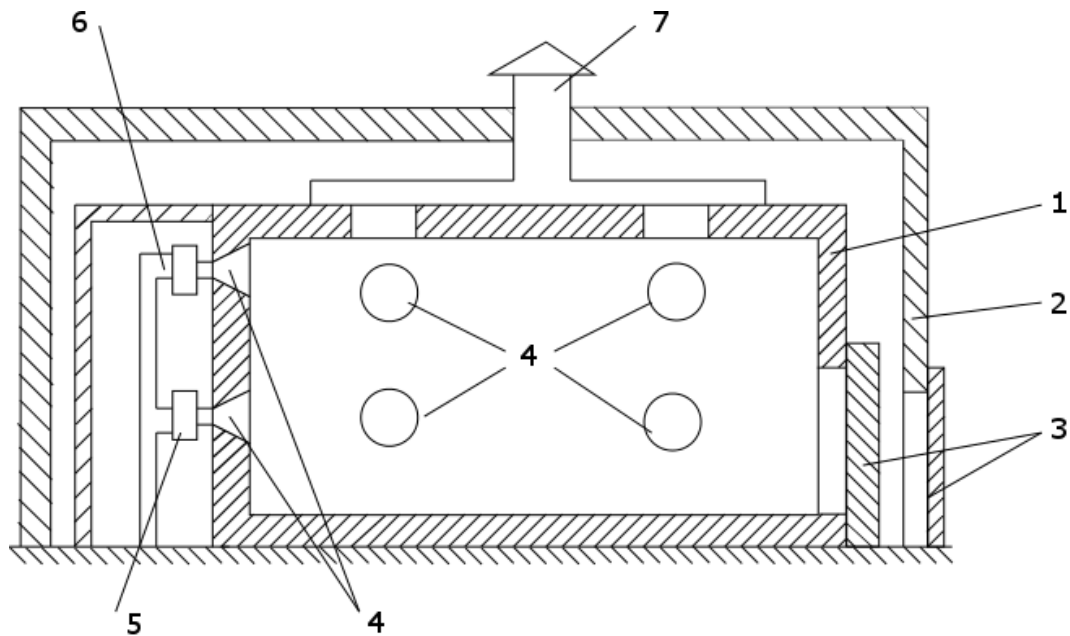


Рис.9.1 Схема закрытого бокса с реверберационной камерой

На этом рисунке введены обозначения: 1 – испытательный бокс, 2 – корпус камеры, 3 - ворота, 4 – рупоры сирен, 5 - газоструйные сирены, 6 - бокс генераторов звука, 7 – выхлопная труба. Газоструйные сирены создают уровни звукового давления до 180 дБ и выше при широком диапазоне частот. Сирены подразделяются на динамические и статические. Принцип работы статических сирен основан на эффекте, заключающемся в том, что при продувании через коническое сопло потока воздуха со сверхзвуковой скоростью в воздушном потоке перед соплом создается периодическое распределение давления с участками неустойчивости. Помещая резонатор в эти участки, получают излучение звуковых волн в окружающее резонатор пространство. Динамические сирены могут воспроизводить различный спектр частот. Принцип работы такой сирены заключается в следующем. В струе воздуха, истекающего из сопел специальной камеры (форкамеры), устанавливается вращающийся диск с отверстиями. Число сопел и шаг распределения их по окружности форкамеры

равны числу и шагу распределения отверстий в диске. Попеременное открывание и закрывание отверстий приводит к резкому изменению газодинамических параметров струи и, следовательно, к возникновению пульсаций давления в горле рупора сирены, которые создают звуковые колебания воздушной среды. Частота звуковых колебаний зависит от частоты вращения диска с отверстиями. В реверберационных камерах происходит отражение звука от стенок и звуковое поле вокруг испытуемого объекта представляет собой интерференционную картину звуковых волн, т.е. возникает эффект усиления колебаний среды.

Толщина стен бокса реверберационной камеры может достигать до 80 см при уровне шума 170 дБ. С внутренней стороны поверхность стен имеет покрытие, обладающее высокой отражательной способностью по отношению к звуковым волнам. Это достигается за счет многослойного покрытия стен различными материалами: штукатурка, металлические листы, облицовочная плитка. Такое сложное покрытие может обеспечивать высокий, свыше 90%, процент отражения звуковых волн. В результате этого в камере создается диффузное звуковое поле, т. е. поле в котором уровни звукового давления одинаковы в любой точке камеры. В среднем объем реверберационной камеры должен превышать объем испытуемого объекта не менее чем в 8 раз. Для обеспечения равномерности акустического поля, камеры (относительно небольших объемов) строят с непараллельными стенками, что способствует улучшению условий реверберации звука. Камеры большого объема обычно делают прямоугольной формы. Для повышения диффузности звукового поля в таких камерах иногда используют рассеиватели – жесткие клинья, устанавливаемые на внутренних поверхностях камер. Приблизительно объем реверберационной камеры можно определить из условия обеспечения нижнего частотного диапазона измерений по формуле

$$f_n = 125 \sqrt{\frac{180}{V}},$$

где V - объем камеры, f_n - нижняя граничная частота.

Генераторы звукового давления устанавливаются в разных местах внутри реверберационной камеры или вне камеры. Уровень шума, достигаемый в таких камерах, составляет 177 дБ. Управляемый спектр шума - от 40 до 10000 Гц. Уровень шума около камеры не превышает 50 дБ, что обеспечивает комфортные и безопасные условия труда персонала.

10. Общая характеристика и проблемы проведения тепловакуумных испытаний

Среди различных видов тепловых испытаний особое место по сложности, значимости, стоимости и трудоемкости занимают тепловакуумные испытания, отличительной особенностью которых является необходимость одновременного моделирования нескольких факторов космического полета. Подготовка таких испытаний должна осуществляться по трем направлениям. Это моделирование испытываемого объекта, подготовке имитационных средств, планирование испытаний, связанное с определением наиболее целесообразных режимов, определением потребной продолжительности испытаний и т.п. Основная трудность моделирования объекта испытаний обусловлена тем, что в наземных условиях отсутствует невесомость, влияние которой на тепловой режим проявляется через гидродинамику, гидростатику теплоносителей, а также через влияние на процессы конденсации и испарения. Кроме того, в процессе испытаний необходимо воспроизводить эффект изменения радиационных характеристик наружных поверхностей изделия РКТ, вызванного деградацией покрытий вследствие воздействия на них корпускулярного и жесткого электромагнитного излучения Солнца и воздействием на гладкие поверхности микрометеорных потоков. Существенные погрешности в модель объекта испытаний могут вноситься и за счет проводов, по которым выводится информация о параметрах испытываемого объекта. Последняя проблема может быть успешно решена посредством применения беспроводных каналов связи.

Однако, одновременное и достоверное воспроизведение при испытаниях всех основных факторов космического пространства, оказывающих влияние на тепловые процессы, является сегодня практически неразрешимой задачей. На

отмеченные проблемы накладываются соображения организационного и экономического характера, поскольку между точностью воспроизведения условий космического пространства, стоимостью производства и эксплуатации имитационных средств существует прямая взаимосвязь.

Считается, что работы по экспериментальному исследованию влияния факторов космического пространства целесообразно расчленять на группы видов воздействия. При исследовании теплового режима КА в целом или его отдельных частей и систем полагают достаточным воспроизводить: глубокий вакуум, тепловое излучение Солнца и планет, практически полное отсутствие теплового излучения по тем направлениям, которые находятся за пределами телесных углов обзора Солнца и планет, а также практически полное поглощение собственного и отраженного излучения самого объекта РКТ.

На тепловой режим объекта оказывают косвенное влияние: ультрафиолетовое и рентгеновское излучение Солнца, корпускулярная радиация, микрометеорные потоки. Влияние этих факторов исследуется отдельно в специальных установках, а полученные данные учитываются при составлении методики и программы комплексных и автономных испытаний. Использование такого подхода тем не менее не обеспечивает высокоточного моделирования условий внешнего теплообмена. Сложности обусловлены тем, что в большинстве случаев возникает необходимость воспроизведения нестационарных во времени и пространстве лучистых полей, формируемых Солнцем и планетой (чаще всего Землей). Это определяет необходимость управления угловой ориентацией объекта одновременно по двум осям относительно потока имитатора солнечного излучения. Кроме того, сам имитатор должен иметь возможность поворачиваться относительно объекта испытаний. Для больших тяжелых объектов не вызывает трудности вращение лишь относительно одной, вертикальной оси, а вращение относительно двух других осей - сложная техническая задача. Но еще более сложной задачей является воспроизведение поля излучения планеты, изменяющего свою пространственную ориентацию в камере. Сложности вызваны и тем, что

необходима координация совместной работы (изменения пространственной и взаимной ориентации) имитационных систем и испытываемого объекта.

Поэтому становятся актуальными приближенные методы моделирования внешнего теплообмена [57]. При этом полагают, что в составе тепловакуумной установки имеются: система вакуумирования, криогенные экраны, имитирующие космический вакуум и идеальные поглощательные свойства космического пространства. Во время проведения испытаний могут реализовываться следующие подходы к созданию тепловых нагрузок.

Воспроизведение экстремальных внешних тепловых нагрузок. В этом случае экспериментальная установка также оснащается имитатором солнечного излучения и имитатором поля излучения планет. В данном случае может осуществляться проверка теплового режима КА в условиях имитации наиболее неблагоприятных сочетаний внутренних тепловыделений и стационарных внешних тепловых нагрузок. Положительный итог таких испытаний гарантирует обеспечение требуемого теплового режима в условиях реального полета. В тоже время отрицательный результат не будет являться 100%-ным доказательством недостаточной эффективности средств обеспечения теплового режима.

Воспроизведение внешних тепловых нагрузок с помощью имитатора Солнца и упрощенного имитатора теплового воздействия планет. Данный способ целесообразно применять в случае, когда тепловое состояние объекта определяется главным образом воздействием солнечного излучения, а влияние планеты является второстепенным фактором. В этом случае с помощью опорно-поворотного устройства тепловакуумной установки можно воспроизводить процессы реальной относительной ориентации объекта и солнца. Тепловое воздействие планеты воспроизводится с помощью упрощенных средств, например, совокупности условно линейчатых, точечных диффузных излучателей.

Воспроизведение суммарных внешних тепловых нагрузок с помощью упрощенных излучающих систем и поверхностных электронагревателей. При отсутствии в тепловакуумной установке имитатора солнечного излучения расчетные тепловые нагрузки от Солнца и планеты можно воспроизводить с

помощью упрощенных излучающих систем, расположенных на значительном расстоянии от испытываемого объекта, а также сетчатых секционированных излучателей, размещаемых в непосредственной близости от поверхности испытываемого объекта.

Выбор того или иного подхода определяется имеющимся набором испытательного оборудования, специфическими особенностями объекта испытаний, совершенством различных видов обеспечения испытаний,

11. Особенности моделирования космического вакуума

Многообразие изучаемых физических процессов и условий в космосе приводит к необходимости дифференцированного подхода к выбору способов и параметров лабораторного моделирования воздействия космического вакуума. При исследовании теплового состояния КА системы, моделирующие космический вакуум, должны обеспечить выполнение ряда условий. Давление газовой среды в экспериментальной установке должно быть настолько малым, чтобы теплообмен между неконтактирующими поверхностями осуществлялся в основном излучением. Необходимо максимально исключить возможность попадания на исследуемый объект паров органических веществ (масел), источником которых могут быть откачные средства систем вакуумирования. Приемлемый уровень давления остаточного газа в установке должен быть на уровне 10^{-6} торр [7]. Это обеспечивает возможность получения достоверных результатов при исследовании тепловых режимов объекта испытаний. Для это при испытаниях также требуется обеспечить пренебрежимо малое, как в условиях реального космического пространства, значение коэффициента возврата Z , поскольку от величины этого коэффициента может существенно зависеть степень загрязнения поверхности КА продуктами собственного выделения. Это может быть достигнуто в том случае, если молекулярной ловушкой остаточных газов являются стенки вакуумной установки. Это диктуется также возможностью реализации в вакуумных установках высоких значений объемной скорости откачки при больших газовыделениях материалов испытываемых объектов.

Структура системы моделирования космического вакуума определяется в основном составом подлежащих откачке газов и паров, а также требуемой величиной вакуума. Система предназначена для вывода вакуумной установки на рабочий режим по давлению и поддержанию этого режима в течение длительного времени при наличии газоотделения от объекта испытаний и периодических газовых выбросов. Должен откачиваться, в первую очередь, атмосферный воздух, кроме того, пары и газы, выделяющиеся из объекта испытаний и его элементов. В связи с многообразием откачиваемых газов и паров, а также ограниченностью технических средств, позволяющих одинаково эффективно откачивать газ в диапазоне давлений от атмосферного (10^5 Па) до рабочего ($\approx 10^{-4}$ Па), обеспечивая при этом реализацию нужных больших, как правило, объемных скоростей откачки, одновременно применяются насосы различных типов: предварительной, основной и вспомогательной откачки. Насосы предварительной откачки предназначены для начального вакуумирования (до $\approx 0,1$) Па, после чего начинают действовать насосы основной и вспомогательной откачки.

Насосы основной и вспомогательной откачки предназначены для откачки газов и паров в рабочем диапазоне давлений и имеют большую объемную производительность. Вспомогательная откачка действует одновременно с основной. Она обусловлена избирательностью действия насосов основной откачки. Для основной откачки применяют насосы, так называемого, поверхностного действия, использующие в максимально возможной степени внутреннюю поверхность установки. Это, главным образом, криогенные насосы конденсационного типа. Работа их основана на вымораживании откачиваемых паров и газов, т.е. образовании твердой или жидкой фазы откачиваемого газа на криоповерхностях и, следовательно, в понижении давления паров и газов в откачиваемом объеме.

Для каждой температуры имеются свои, так называемые, неконденсируемые газы с равновесным давлением насыщенных паров, превышающим заданное. Поэтому при использовании криоконденсационных

насосов для основной откачки для получения сверхнизких давлений одновременно необходимо использование насосов вспомогательной откачки. Криогенные насосы конструктивно выполняются в виде криорешеток, по внутренним каналам которых циркулирует хладагент. Одни охлаждаются жидким или кипящим азотом, другие - охлаждаются холодным газообразным или жидким гелием. Экранирование наиболее холодных поверхностей ухудшает характеристики откачки этих устройств, но значительно повышает их экономичность. В целом криорешетки обеспечивают внутренним поверхностям моделирующих установок высокую эффективность откачки и низкий возврат.

В качестве насосов вспомогательной откачки в современных установках используются комбинации насосов различных типов. Ранее в качестве насосов вспомогательной откачки применялись только паромасляные диффузионные насосы, присоединяемые извне к вакуумной камере с помощью соединительных патрубков. Такая внешняя откачка неприемлема в качестве основной по причине недостаточности объемной скорости. Поэтому в диффузионных насосах вместо масла может использоваться ртуть. В этом случае насосы называются ртутными пароструйными.

Более перспективными для вспомогательной откачки являются криосорбционные насосы и электрофизические средства откачки [17]. Криосорбционная откачка происходит в результате физической и химической адсорбции газов на специальных охлаждаемых твердых телах (сорбентах). В качестве газопоглотителей применяют пленки титана, вольфрама, палладия, никеля и других металлов. Наиболее широко используют пленки титана. Титановые геттерные насосы имеют достаточно высокую начальную удельную скорость откачки для наиболее распространенных типов газов. Однако инертные газы этими насосами откачиваются плохо. Геттерным насосам свойственны и другие недостатки: проникновение паров металла – геттера в откачиваемый объем, малая скорость откачки органических соединений и снижение производительности при откачке органических соединений и углекислого газа. Другой метод криосорбционной откачки основан на использовании в качестве адсорбентов мелкопористых веществ (активированного угля, силикагелей,

цеолитов). Адсорбент необходимо периодически регенерировать (восстанавливать адсорбционные свойства) путем нагрева в вакууме для десорбции адсорбента.

Принцип действия электрофизических средств откачки основан на различных комбинациях способов генерации пара геттеров, ионизации молекул откачиваемых газов и ускорения образованных ионов с последующим протеканием различных физико-химических процессов при взаимодействии частиц с поверхностью сорбции. По методу нанесения геттерных покрытий различают ионно-геттерные, магнитные электроразрядные и комбинированные насосы. Функционально насос разделяется на испарительную и ионизационную системы. Ионизационная система используется также и для диссоциации сложных молекул - паров воды, метана, тяжелых углеводородов.

Для вспомогательной откачки используют и турбомолекулярные вакуумные насосы, содержащие ряд статорных и роторных дисков с радиальными косыми пазами. При вращении ротора насоса молекулам откачиваемого газа сообщается импульс в направлении выпускного патрубка. Динамический напор молекулярного газа, образующийся вследствие импульса, уравнивает перепад давлений в проточной части насоса, которую составляют диски с пазами. Турбомолекулярные вакуумные насосы имеют ряд следующих преимуществ перед другими средствами вакуумной откачки:

- обладают способностью откачивать все газы независимо от их химической активности, молекулярного веса, величины давления насыщенных паров при той или иной температуре;
- не загрязняют среду откачиваемого объема парами углеводородов или другими рабочими телами, как диффузионные, геттерные насосы и др.;
- имеют большую быстроту действия при откачке газов с малой молекулярной массой, обычно трудно удаляемых из высоковакуумных систем.

«Холод» и «черноту» космоса моделируют с помощью экранов, охватывающих рабочий объем установки и охлаждаемых до низких температур криогенными хладонносителями. Эти же экраны выполняют и функцию крионасосов основной откачки вакуумной камеры. На экраны наносится

покрытие, обладающее высоким значением поглощательной способности во всем диапазоне спектра теплового излучения. Считается, что моделирование практически ничего не излучающего космического пространства может осуществляться с удовлетворительной точностью с помощью охлаждаемых до температур кипящего азота экранов (≈ 77) К. Однако конструктивные особенности экранов могут явиться источником существенных погрешностей моделирования. Экраны, как правило, выполняются в виде оребренных каналов [1]. Участки оребрения, наиболее удаленные от каналов, по которым циркулирует хладоноситель, могут иметь температуры, существенно превышающие температуру кипящего азота. Поэтому экраны могут являться источником дополнительного фонового излучения.

Для моделирования “черноты” космического пространства (идеальных поглощательных его свойств) на экраны наносятся покрытия, обладающие максимально возможной степенью черноты и высокой поглощательной способностью по отношению к излучению имитатора Солнца. Однако возможности всех имеющихся покрытий ограничены в этом отношении. При этом придание экранам макрошероховатости повышает поглощательную их способность. Для этого на достаточно толстой стенке экрана создают шероховатости в виде канавок различного профиля. Но в процессе работы тепловакуумной установки из-за образования на экранах криоосадка поглощательная способность экранов может существенно снизиться. Поэтому при проведении испытаний необходимо в полной мере учитывать специфические особенности объекта и регламентированную документацией методику их проведения.

11.1. Приборы для измерения давления разреженных газов

Проведение вакуумных испытаний неразрывно связано с необходимостью постоянного мониторинга давления создаваемого вакуума в испытательной камере, поскольку указанные испытания, как правило, проводятся в течении достаточно длительного времени, и предварительного комплекса работ по поиску и устранению возможных мест недостаточной герметичности

конструкций камеры. Эти задачи могут быть решены с помощью соответствующих измерительных приборов – вакуумметров.

По принципу действия вакуумметры можно подразделить на следующие типы [27]:

- классические — являются обычными манометрами (жидкостными либо anerоидами) для измерения малых давлений. В жидкостных вакуумметрах в измерительном колене применяется масло с известной плотностью и с по возможности малым давлением пара с тем, чтобы не нарушать вакуум. Обычно жидкостные манометры изолируют от остальной вакуумной системы при помощи азотных ловушек — специальных устройств, наполняемых жидким азотом и служащих для вымораживания паров рабочего вещества манометра. Область измеряемых давлений от 10 до 100000 Па;
- ёмкостные — основаны на изменении ёмкости конденсатора при изменении расстояния между обкладками. Одна из обкладок конденсатора выполняется в виде гибкой мембраны. При изменении давления мембрана изгибается и меняет ёмкость конденсатора, которую можно измерить. После градуировки возможно использовать прибор для измерения давлений. Область измеряемых давлений от 1 до 1000 Па;
- терморезисторные — работают в мостовой схеме, стремящейся поддерживать постоянное сопротивление (а значит температуру) терморезистора, открытого измеряемому давлению. Чем выше давление газа, тем большую мощность нужно подводить к терморезистору для поддержания неизменной температуры. Соответственно, между давлением и напряжением на датчике (током через него) имеется однозначная зависимость. Если терморезистором является платиновая нить, то такой датчик называется манометром Пирани. Терморезисторные манометры применяются для измерения давлений от 10^{-3} до 760 и более торр;
- термопарные — принцип действия основан на охлаждении за счёт теплопроводности. Термопара находится в контакте с нагреваемым

проводом. Чем лучше вакуум, тем меньше теплопроводность газа, и выше температура проводника (теплопроводность разрежённого газа прямо пропорциональна его давлению). Проградуировав подключенный к термопаре милливольтметр при известных давлениях можно использовать измеряемое значение температуры для определения давления. Область измеряемых давлений от 10^{-3} до 10 торр;

- ионизационные — принцип действия основан на ионизации газа. По сути, представляют собой вакуумный диод, на анод которого подано положительное, а на дополнительный электрод, называемый коллектором, большое отрицательное напряжение. При понижении давления газа уменьшается число атомов, способных подвергнуться ионизации, и соответственно ионизационный ток (ток коллектора), текущий между электродами при данном напряжении. Область измеряемых давлений составляет от 10^{-12} до 10^{-1} торр. Различают ионизационные вакуумметры с холодным катодом (Пеннинга и магнетронные) и с накаливаемым катодом.
- альфатрон — разновидность ионизационного вакуумметра. Отличается от последнего тем, что для ионизации используются не электроны, а альфа-частицы, испускаемые источником на изотопах радия или плутония. Альфатроны проще, надежнее, и точнее вакуумметров с катодом, но из-за низкой чувствительности, требующей очень сложной схемы измерения сверхмалых токов, не могут их заменить. Обычно используются в том же диапазоне давлений, что и термопарные (терморезисторные) вакуумметры.

Конструктивно практически все вакуумметры выполняются в виде электронных ламп со стеклянным отростком, соединяющимся с контролируемым объёмом с помощью шланга или припаивания.

Назначение различных типов этих приборов практически одно и то же. Отличия определяются такими метрологическими характеристиками, как точность и диапазон измерений. Так механическими, можно измерять разрежение до 100 Па, жидкостными – до 0,1 Па, тепловыми – до 0,001 Па, а компрессионными – до 0,001 Па. Ионизационные вакуумметры способны

измерить разрежение менее 10^{-8} Па. Различают абсолютные и дифференциальные вакуумметры. Для первых характерна одинаковая чувствительность для всех газов, образующих атмосферу. Вторые измеряют разность давлений по обе стороны разделительного чувствительного элемента.

Для любого вакуумметра характерно наличие двух блоков: один из них преобразует в электрический сигнал любые изменения состояния чувствительного элемента, другой - оценивает этот сигнал, пересчитывает в выбранные единицы давления, и информирует потребителя о степени разрежения на контролируемом участке технологической линии, контролируемом объеме и т.п. Измерительный блок вакуумметра – часть вакуумметра, предназначенная для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем, и содержащая блок питания, и все электрические цепи, необходимые для работы вакуумметра. В настоящее время наблюдается тенденция объединения в одном корпусе (моноблоке) измерительного блока и преобразователя давления. Моноблок, как правило содержит и индикаторное устройство вакуумметра, в качестве которого используют жидкокристаллические дисплеи.

Жидкостной вакуумметр - вакуумметр полного давления, действие которого основано на уравнивании измеряемого давления или разности давлений давлением столба жидкости. Компрессионный вакуумметр – жидкостной вакуумметр, в котором для измерения давления разреженного газа последний подвергают предварительному сжатию.

Деформационный вакуумметр – вакуумметр полного давления, действие которого основано на зависимости деформации чувствительного элемента или развиваемой им силы от измеряемого давления. Для измерения давления в низковакуумных системах очень часто используют деформационные стрелочные вакуумметры с чувствительным элементом, выполненным в виде трубки Бурдона или капсульной пружины и отсчетным устройством часового типа, эти

вакуумметры можно выделить в отдельный класс - механические стрелочные вакуумметры.

Мембранный вакуумметр – деформационный вакуумметр, в котором чувствительным элементом является мембрана или мембранная коробка. В современной вакуумной технике мембранные вакуумметры получили большое распространение благодаря потребности высокоточного измерения разреженных газов в микроэлектронной и химической промышленности. Принцип измерения давления за счет измерения деформации упругой мембраны объединился с высокоточным емкостным принципом измерения перемещений (оценивается емкость конденсатора при перемещении одной из его обкладок). Вакуумметры данного типа обладают отличной химической стойкостью.

Вязкостный вакуумметр – вакуумметр полного давления, действие которого основано на зависимости вязкости разреженного газа, определяемой движением в нем твердого тела, от измеряемого давления. Современные вакуумметры данного типа отличаются высокой точностью, надежностью и в то же время сложной конструкцией и высокой стоимостью, поэтому они не получили широкого распространения. Вязкостные вакуумметры применяются в некоторых изделиях криогенной техники и других устройствах, где важно обеспечить высокую герметичность вакуумной системы.

Тепловой вакуумметр - вакуумметр полного давления, действие которого основано на зависимости теплопроводности разреженного газа от давления.

Термопарный вакуумметр – тепловой вакуумметр, которым использована зависимость ЭДС термопары от измеряемого давления. Термопарные вакуумметры выпускаются как в виде компактных моноблоков, так и в виде переносных приборов. Датчики для термопарных вакуумметров также выпускаются в исполнении для сложных условий эксплуатации, они используются, например, для контроля вакуума в рубашках криогенных трубопроводов стартовых комплексов космодромов [28].

Вакуумметр сопротивления – тепловой вакуумметр, действие которого

основано на зависимости электрического сопротивления нагреваемого током элемента от давления газа.

Термомолекулярный вакуумметр - вакуумметр полного давления, действие которого основано на передаче чувствительному элементу суммарного импульса молекул газа, отражающихся от поверхностей, имеющих различную температуру.

Ионизационный вакуумметр - вакуумметр полного давления, действие которого основано на зависимости ионного тока, образованного в газе в результате ионизации молекул разреженного газа, от давления.

Радиоизотопный ионизационный вакуумметр – ионизационный вакуумметр, в котором для ионизации газа применяют излучение радиоактивных источников.

Магнитный электроразрядный вакуумметр – ионизационный вакуумметр, действие которого основано на зависимости тока электрического разряда в магнитном поле от измеряемого давления.

Вакуумметр Пеннинга - магнитный электроразрядный вакуумметр, преобразователь которого имеет рамочный анод, расположенный между катодными пластинами.

Электронный ионизационный вакуумметр – ионизационный вакуумметр, в преобразователе которого ионизация газа осуществляется электронами, ускоряемыми электрическим током.

Электронный ионизационный вакуумметр с осевым коллектором - электронный ионизационный вакуумметр, в котором фоновое давление уменьшено за счет использования в качестве коллектора ионов тонкой проволоки, помещенной соосно с цилиндрической сеткой, при этом катод укрепляют снаружи сетки.

Экстракторный вакуумметр - электронный ионизационный вакуумметр, в котором фоновый ток уменьшен за счет использования в качестве коллектора ионов короткой и тонкой проволоки, находящейся на оси анода и выведенной из области ионизации.

Электронный ионизационный вакуумметр с магнитным полем - электронный ионизационный вакуумметр, преобразователь давления которого представляет собой цилиндрический магнетрон, в котором магнитное поле используется для удлинения траектории электронов и увеличения числа образованных ионов. Такие вакуумметры являются одними из самых распространенных для высоковакуумного диапазона.

Вакуумметр парциального давления – вакуумметр на базе масс-спектрометра для измерения давления, которое оказывал бы один из газов, входящих в газовую смесь, если из нее удалить остальные газы при условии сохранения первоначальных объема и температуры. Вакуумметры парциального давления находят применение и в качестве течеискателей крупногабаритных камер для проведения испытаний на воздействие глубокого вакуума.

12. Моделирование электромагнитного излучения Солнца.

Наиболее предпочтительным в отношении требуемого результата является такой способ моделирования, при котором обеспечивается имитация максимально полного потока электромагнитного излучения Солнца по основным его параметрам. Принципиальных проблем с реализацией такого подхода не существует. Однако имеет место прямая и весьма сильная связь между точностью, стоимостью разработки и эксплуатации солнечных имитаторов. Поэтому предпочтительными являются имитаторы, отвечающие реальным требованиям по точности воспроизведения основных параметров потока солнечного излучения.

Основными элементами имитатора солнечного излучения являются источник излучения и спрямляющая система. Последняя предназначена для формирования потока излучения с практически параллельными лучами. Такая система включает в себя преломляющие, отражающие и поглощающие элементы. Различают имитаторы, построенные по осевой и неносовой схемам. В большинстве случаев, независимо от схемы построения, источники излучения

располагаются вне, а элементы спрямляющей системы внутри вакуумной камеры. Имеют место и имитаторы с внутрикамерным расположением источников излучения, специфической проблемой применения которых является необходимость отведения тепла, выделяющегося при работе источника излучения.

В осевых схемах [18], представленных на рис. 12.1 малорасходящийся поток излучения получают с помощью осесимметричных параболического, сферического или эллипсоидного зеркал, в фокусах которых находятся достаточно мощные источники излучения. Но таким простым схемам присущ и существенный недостаток - источник излучения находится в вакуумной камере, что порождает трудности эксплуатационного характера, а при использовании источников излучения без охлаждения кварцевых колб весьма существенно сказывается и на спектре их излучения [6].

Кроме того, собственное и отраженное излучение, исходящее от испытуемого объекта после переотражения от основного зеркала может вновь попасть на объект. Это приводит к существенным погрешностям в воспроизведении внешних тепловых нагрузок и искажениям результатов испытаний.

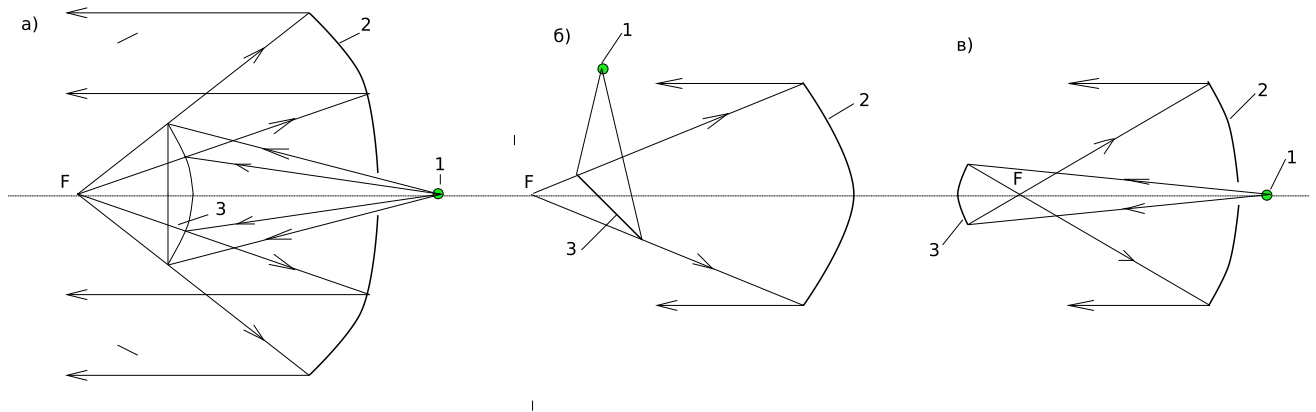


Рис. 12.1 Осевые схемы построения имитаторов

а - схема Кассегрена; б - схема Ньютона; с - схема Грегори

Использование вторичных зеркал для устранения главного недостатка осевых схем обуславливает возникновение дополнительной проблемы в виде потребности охлаждения дополнительных зеркал, нагреваемых из-за воздействия лучистых потоков большой плотности.

В не осевых схемах [18] точечный источник излучения расположен в фокусе параболоида вращения, в качестве коллиматора используется часть зеркальной поверхности этого параболоида, расположенная в стороне от его оси симметрии. Примером неосевой схемы является, в частности, схема Гершеля, приведенная на рис. 12.2 [2]. Для такой схемы характерны положительные особенности. Так, сам источник излучения не затеняет поток излучения, исходящий от зеркала в сторону рабочей зоны тепловакуумной установки. Имеется зона, обладающая тем свойством, что излучение, исходящее из этой зоны и падающее на зеркало, после переотражения не возвращается в рабочую зону. Требуется минимальное число потребных оптических элементов. В тоже время недостатком такой неосевой схемы является неравномерность плотности излучения как по сечению пучка, так и по объему камеры. Принципиальное отличие различных типов неосевых имитаторов заключается в особенностях оптических схем осветительной части, в которой формируется лучистый поток.

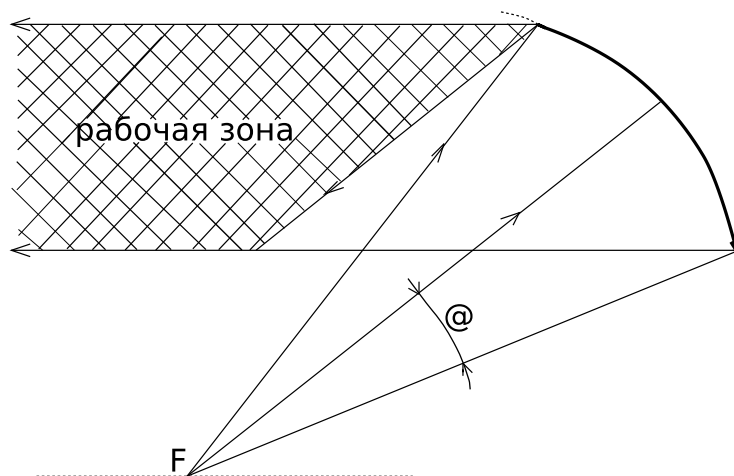


Рис.12.2 Неосевая схема Гершеля.

Схемы с внутрикамерным размещением источников излучения находят применение в том случае, когда уже имеется готовая вакуумная камера без имитатора Солнца и нужно дооснастить ее имитатором солнечного излучения, не изменяя конструкцию вакуумной камеры. Излучающая система в таком имитаторе может выполняться по-разному: она может быть образована дуговыми ксеноновыми трубчатыми лампами, заключенных в отражатели или высокочастотными ксеноновыми лампами, размещаемыми в фокусе параболоидного или сферического отражателя.

12.2. Источники излучения, используемые в имитаторах солнечного излучения.

Основная часть энергии электромагнитного излучения Солнца, непосредственно влияющая на тепловой режим объекта РКТ, приходится на интервал (0,3 – 3) мкм. Источник излучения, используемый в имитаторе Солнца, считают совершенным, если в отмеченном диапазоне длин волн относительная величина спектральной интенсивности излучения источника отличается от спектра излучения Солнца не более чем на 5 %. Однако выпускаемые промышленностью источники не удовлетворяют этому требованию в полной мере. На том или другом участке отмеченного спектрального диапазона отличия спектров могут существенно превышать 5 % [10].

Чаще всего применяют шаровые дуговые лампы высокого давления с ксеноновым наполнением. Спектр излучения таких ламп несильно отличается от спектра излучения Солнца, кроме интервала длин волн (0,8 - 1,05) мкм, где наблюдаются значительные характерные выбросы энергии (см. рис. 16.3). В указанном интервале длин волн содержится около 15 % интегральной энергии излучения Солнца, а у ксеноновой лампы - более 30% от общей энергии ее излучения [19]. В ряде имитаторов этот специфический выброс энергии излучения ксенона может корректироваться (поглощаться) специальными покрытиями или фильтрами, через которые излучение заводится внутрь тепловакуумной установки и попадает на проекционную часть имитатора - зеркала. В результате такой корректировки спектр излучения имитатора становится близким спектру излучения Солнца. При отсутствии аппаратной коррекции спектра ксеноновых ламп проводят аналитические вычисления энергетических параметров потока излучения имитатора с учетом данных по спектральной поглощающей способности материалов и покрытий, применяемых в конкретном изделии РКТ.

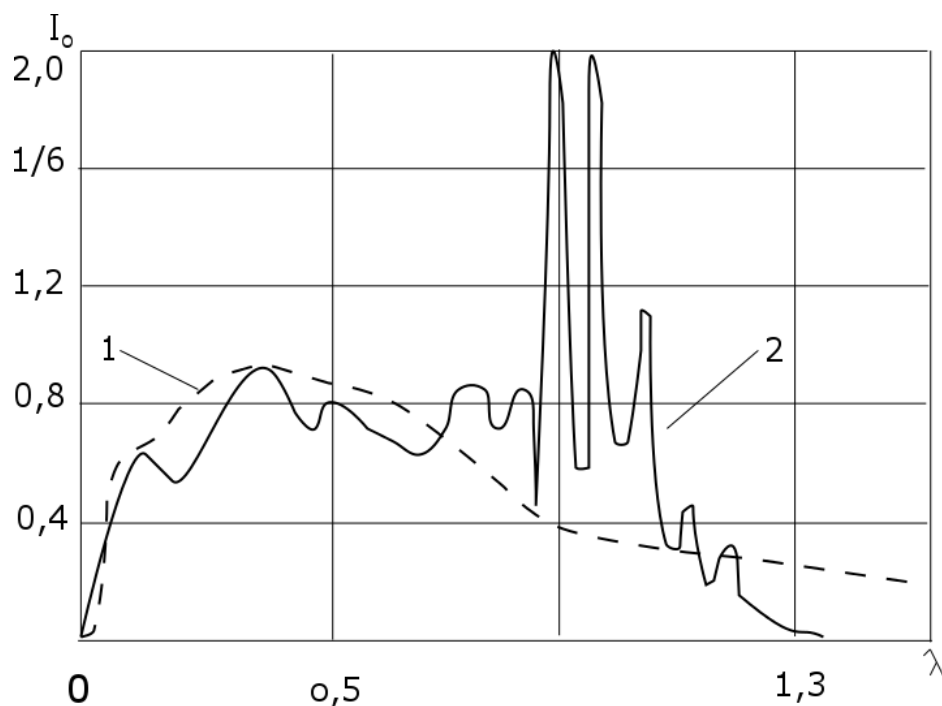


Рис. 12.3 Спектры излучения дуговой ксеноновой лампы ДГсРМ-55000 [24] (кривая 2) и спектр излучения Солнца (кривая 1)

Спектр излучения ксенонового источника в основном соответствует спектру излучения дуговых шаровых ламп высокого давления с ксеноновым наполнением. Однако имеет место существенное отличие: при λ больше 1,3 мкм, у рассматриваемой лампы энергия излучения практически отсутствует. Это обусловлено поглощением излучения водой, циркулирующей между двойными стеклами выходного окна лампы. Зависимость относительной величины спектральной интенсивности излучения J от длины волны λ излучения для этой лампы представлена на рисунке (кривая 2). На этом же рисунке для сравнения представлен и спектр излучения Солнца (кривая 1).

Погрешности, обусловленные несовпадением спектра излучения Солнца и ксеноновой лампы в ряде случаев достаточно велики. Это означает, что в эксперименте плотность поглощаемого наружной поверхностью КА потока излучения имитатора Солнца будет меньше, чем в натуральных условиях. Данное обстоятельство может усугубляться из-за деградации материалов под действием реальных факторов космического пространства и обусловлено естественным отличием поглощательной способности многих покрытий изделий РКТ в условиях эксперимента на земле и в условиях открытого космического

пространства. Аппаратная или аналитическая корректировка спектра дуговых ламп с ксеноновым наполнением должна проводиться в направлении уменьшения доли энергии излучения в полосе спектра (0,8 - 1,05) мкм.

Решение данного вопроса возможно путем использования других источников, спектр излучения которых имеет существенно лучшее приближение к солнечному, по сравнению с дуговыми ксеноновыми лампами. К ним относят кварцевые дуговые лампы, наполненные парами ртути с добавками хлорида алюминия, иодида индия и бромида олова. Конструктивно эти лампы не отличаются от шаровых ксеноновых ламп, но их применение затруднено из-за недостаточно большой мощности, а также слишком малого ресурса работы. Могут применяться и угольные дуговые источники, но их проблемой является большой расход положительного электрода.

13. Испытания на воздействие радиационных факторов и магнитных полей.

Ионизирующие излучения в процессе эксплуатации могут вызвать необратимые изменения свойств материалов РКТ и особенно электрических параметров приборов и систем, содержащих электронные блоки и микромеханические сенсоры, изготовленные по технологии MEMS. По составу частиц ионизирующие излучения подразделяются на следующие основные виды: гамма - излучение (γ), нейтронное (n), электронное (e), протонное (p). Основными характеристиками ионизирующего излучения являются энергия частиц, выражаемая в электрон-вольтах (эВ), и плотность потока частиц, выражаемая числом частиц, проходящих через единицу времени через единицу площади.

В реальных условиях космического пространства ионизирующие излучения имеют обычно сложное распределение частиц по энергиям – свой характерный энергетический спектр. Уровень воздействия проникающей радиации зависит от времени воздействия излучения с данной плотностью потока на вещество и выражается числом частиц, прошедших через площадку в 1 см^2 за время облучения интегральным потоком Φ . Другими характеристиками воздействия на вещество излучения со сложным энергетическим спектром

является доза D и мощность дозы - значение дозы, отнесенное к единице времени.

Действие ионизирующих излучений на материалы и изделия разделяют на импульсное (протекающее очень короткое время) и непрерывное (длительное). Воздействие непрерывной проникающей радиации особенно сильно сказывается на электронике объектов РКТ. Оно приводит к постепенному необратимому изменению электрических параметров приборов и изделий на борту, вызываемому в основном смещением атомов, т. е. нарушением в структуре материала, а также незначительным изменением химического состава (активацией).

Импульсная радиация, действующая короткое время ($10^{-7} - 10^{-3}$) с, наряду с необратимым изменением электрических параметров изделий электронной техники, создает очень большую плотность ионизации как в самих облучаемых изделиях, так и вокруг и изделий (ионизация воздуха). Это, как правило, вызывает обратимые изменения электрических параметров изделий. Поэтому при исследовании необратимых изменений электрических параметров материалов и изделий электронной техники изучается их зависимость от интегрального потока частиц или дозы облучения, а при исследовании обратимых изменений - их зависимость от плотности потока или мощности дозы.

Источниками радиоактивного излучения в околоземном пространстве являются: - потоки космических лучей, включающие в себя первичное космическое (галактическое) излучение и корпускулярное излучение Солнца, возникающее при интенсивных хромосферных вспышках на Солнце; - радиационные пояса Земли (естественные), расположенные на расстояниях от нескольких сот до нескольких десятков тысяч километров от поверхности Земли [19].

Исследования, выполненные с помощью первых советских и американских, искусственных спутников Земли; показали, что наша планета окружена помимо газовой оболочки, слоями заряженных частиц большой

энергии, так называемыми радиационными поясами. Радиационные пояса Земли были открыты Ван-Алленом и Верновым в 1958 г. при первых полетах советских и американских искусственных спутников. Образование этих поясов является естественным следствием наличия магнитного поля Земли и существования потоков частиц, пронизывающих космическое пространство. Внутренний радиационный пояс располагается на расстоянии от 1000 до 4500 км, считая от поверхности Земли). Внутренний радиационный пояс образован частицами большой энергии (в основном это протоны и электроны); его положение и характеристики сравнительно устойчивы и регулярно воспроизводятся при повторных исследованиях. Второй, наружный радиационный пояс, имеет более неопределенные и меняющиеся со временем очертания, ее середина находится на расстоянии около $3,5 \cdot R_z$, где $R_z=6400$ км [10]. Оба пояса в общем случае представляют собой соосные торообразные тела.

Происхождение земного магнитного поля не может считаться выясненным окончательно. Несомненна его связь с вращением планеты и наличием токов в глубинных, жидких проводящих слоях земного ядра. Земля - это гигантский линейный магнит, геомагнитная ось которого наклонена под углом в $11,5^\circ$ к оси вращения Земли NS. Центр магнитного диполя смещен приблизительно на 400 км относительно центра Земли. Магнитные силовые линии сгущаются в области высоких геомагнитных широт, создавая в околоземном пространстве конфигурацию кольцевой магнитной ловушки с пробками [6, 9].

Первичные галактические лучи, движущиеся в межзвездном пространстве, представляют собой ядра различных химических элементов. Эти частицы обладают очень высокой энергией до 10^{20} эВ, но плотность потока этих частиц настолько мала, что доза облучения за год будет составлять не более (1 – 10) рад. Рад (от англ. radiation absorbed dose) — внесистемная единица измерения поглощённой дозы ионизирующего излучения. Один рад равен поглощённой дозе излучения, при которой облучённому веществу массой 1 грамм передаётся энергия ионизирующего излучения 100 эрг. $1 \text{ Рад} = 100 \text{ эрг/г} = 0,01 \text{ Дж/кг} = 0,01 \text{ Гр}$.

Солнечное ионизирующее космическое излучение наблюдается только в период солнечной активности (во время вспышек) и продолжается короткое время (до 4 суток). Оно состоит в основном из протонов (85 %) и небольшого количества α - частиц и ядер легких элементов и имеет энергию 10^8 эВ. Максимально возможные годовые дозы для протонов солнечных космических излучений могут составить величину порядка ($10^3 - 10^4$) рад – на поверхности объекта и ($10^2 - 10^3$) рад за слоем защиты 1 г/см^2 .

13.1. Источники радиации, применяемые при экспериментальной отработке

Для исследования радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры в качестве источников нейтронного, электронного, протонного и γ -излучений находят применение различные исследовательские ядерные реакторы импульсного и непрерывного действия, импульсные генераторы нейтронов, импульсные реакторы, импульсные рентгеновские установки, ускорители электронов и γ - установки непрерывного действия.

Поскольку нейтроны образуются только в результате ядерных реакций, то в качестве источников нейтронов можно использовать радиево-бериллиевые источники, в которых образование нейтронов происходит в результате ядерной реакции взаимодействия ядер бериллия с α - частицами радия. В качестве источников нейтронов можно использовать также ядерные реакции, происходящие при бомбардировке некоторых материалов (дейтерий, бериллий, литий) заряженными частицами (дейтронами, α -частицами и др.) на ускорителях заряженных частиц. Однако отмеченные источники имеют относительно малый выход нейтронов. Существенно более мощными источниками нейтронов являются исследовательские ядерные реакторы на тепловых, промежуточных и быстрых нейтронах.

По принципу работы все реакторы делятся на импульсные, развивающие большую мощность при очень коротком времени функционирования ($10^{-5} - 10^{-2}$) с, и статические (длительного действия) [2]. Для испытаний и исследований материалов и изделий электронной техники на воздействие импульсной радиации ядерного взрыва и непрерывного воздействие радиации бортовых

ядерных энергетических установок широко используются исследовательские ядерные реакторы как импульсного, так и статического действия.

Ускорители - это устройства, в которых используется эффект ускорения заряженных частиц под действием электрического поля. Основными характеристиками ускорителя являются энергия ускоренных частиц и ток пучка частиц. Первыми, наиболее простыми типами ускорителей заряженных частиц, были электростатические генераторы, действие которых основано на использовании прямого ускорения заряженных частиц в электрическом поле. Недостатком таких ускорителей является трудность получения заряженных частиц с высокими энергиями (выше нескольких мегаэлектронвольт). Дальнейшее развитие и совершенствование техники ускорения заряженных частиц шло по пути использования высокочастотного электрического поля. Ускорители, основанные на ускорении заряженных частиц с помощью высокочастотного поля, подразделяются на линейные и циклические. Кроме того, ускорители подразделяются: по виду орбиты движения частиц; ускоряющему электрическому полю; приложенному магнитному полю. В зависимости от типа ускорителя пучок заряженных частиц, выходящий из него, может быть непрерывным, импульсным и состоящим из одного или большего числа «сгустков» частиц, следующих один за другим с большой частотой.

Для исследования радиационных эффектов в материалах и изделиях электронной техники при импульсном воздействии радиации широко используются мощные генераторы коротких импульсов жесткого рентгеновского излучения, основой которых являются сильноточные импульсные электронные ускорители. Такие генераторы при диапазоне рабочих напряжений порядка 10^7 В и импульсных токах через рентгеновскую трубки порядка $(10^4 - 10^6)$ А обеспечивают возможность получить импульсы рентгеновского излучения продолжительностью $5 \cdot 10^{-2}$ с при мощности дозы вблизи выходного окна рентгеновской трубки до 10^{12} Р/с на расстоянии 1 м от анода рентгеновской трубки [4].

В качестве источников γ - излучения в настоящее время могут применяться радиоактивные изотопы химических элементов (либо их смесь) (в

частности, в качестве излучателей используются радиоактивные изотопы кобальта Co^{60} с периодом полураспада 5,3 года) и ускорители электронов, излучающие тормозное γ - излучение с непрерывным спектром при торможении электронов в поле ядер мишени.

14. Испытания на воздействие электрических и магнитных полей

Электромагнитное излучение Солнца может вызывать фотоионизацию материалов и фотоэлектронную эмиссию, ведущую или к утечке заряда, если изделие РКТ заряжено до высоких потенциалов. Скапливающийся на выступающих частях конструкции электростатический заряд обуславливает создание помех в радиосвязи, в том числе в беспроводных сетях передачи данных на борту изделия. Заряды, появляющиеся на объекте РКТ вследствие фотоионизации, соответствуют пространственным потенциалам и могут в отдельных случаях достигать 100 В.

В процессе эксплуатации изделие РКТ и его системы должны быть стойкими к воздействию электромагнитных излучений, то есть оно должно выполнять свои функции и сохранять параметры в пределах установленных норм при и после действия электромагнитных излучений. Поэтому системы РКТ, как правило, испытывают при одновременном воздействии электрической и магнитной составляющих электромагнитных излучений, которые создаются генераторами электромагнитного излучения. Изделие помещают в зону поля электромагнитного излучения стенда с подключением контрольно - измерительной аппаратуры для проверки функционирования и регистрации результатов испытаний. Размеры испытываемого изделия должны быть в несколько раз меньше соответствующих размеров рабочей зоны стенда.

В процессе испытаний объект последовательно поворачивают вокруг двух ортогональных осей относительно векторов электрического и магнитных полей. В процессе и после воздействия электромагнитных излучений производят регистрацию параметров, определяющих работоспособность изделия. Если аппаратура в процессе и после воздействия электромагнитного импульса сохраняет свою работоспособность и параметры в пределах норм, то стойкость аппаратуры соответствует заданным требованиям.

Испытания на стойкость к воздействию электромагнитного импульса рекомендуется проводить до проверки работоспособности при воздействии механических и тепловых нагрузок [6]. При испытаниях на воздействие постоянных внешних магнитных полей изделие помещают в зону, имеющую равномерное магнитное поле. Параметры воздействий должны соответствовать условиям применения по назначению в открытом космосе.

Электрические испытания приборов и систем изделий РКТ проводятся с целью проверки электрической прочности, сопротивления изоляции и с целью проверки нормального функционирования электрических цепей при отклонении напряжения и частоты питания от номинальных значений. Под электрической прочностью понимается способность электрической изоляции выдерживать действие приложенного к ней электрического напряжения. Она определяется значением напряжения, при котором наступает пробой изоляции (пробивным напряжением). Последнее зависит от шероховатости поверхности, наличия масла, влажности, пыли, гигроскопичности и т. п.

Под воздействием приложенного напряжения электроизоляционные материалы проявляют свойства электропроводности. Электропроводность диэлектриков намного ниже, чем у проводников, но именно эта характеристика диэлектриков играет важную роль в безотказном функционировании оборудования. Ток утечки диэлектрика имеет две составляющие: ток, проходящий по его поверхности, и ток, проходящий через диэлектрик. Отношение напряжения, приложенного к диэлектрику, к силе тока утечки называется сопротивлением изоляции. Сопротивление зависит от механических воздействий, температуры, проникающего излучения, состояния поверхности диэлектрика, качества обработки, сборки, пропитки и т.п. Проверку сопротивления изоляции проводят, как правило, в нормальных климатических условиях после проверки на воздействия механических и климатических факторов. Нижний предел сопротивления изоляции должен быть: - не менее 20 МОм в холодном сухом состоянии и не менее 2 МОм в нагретом состоянии; - не менее 1 МОм в увлажненном состоянии [17]. Электрическая прочность и

сопротивление изоляции проверяются на собранных блоках или системах: - между электрическими цепями и металлическими изолированными частями приборов; - между разъединяющимися в процессе функционирования электрическими цепями; - между электрически несоединенными цепями. Причем вначале проверяется электрическая прочность, а затем измеряется электрическое сопротивление изоляции. Объем электрических испытаний определяется нормативно - технической документацией на изделие.

При испытании изделия на воздействие отклонения напряжения питания сначала устанавливают напряжение, равное номинальному значению, и после окончания переходных процессов в изделии проводят проверки характеристик, установленных в технических условиях на изделие. Затем напряжение питания увеличивается до верхнего предельного значения и после завершения переходных процессов проверяют требуемые характеристики. Могут использовать плавный или скачкообразный режим изменения напряжения в зависимости от конкретных условий эксплуатации. Точно также напряжение питания уменьшают до нижнего предельного значения и проверяют требуемые характеристики. Изделие считается выдержавшим испытание, если при измененных значениях напряжения питания его характеристики находятся в пределах норм, установленных в технических условиях на изделие. Аналогичным образом проводят испытания на воздействие вариаций частоты питания.

15. Задачи и структура космодрома «Плесецк»

Космодром “Плесецк” (1-й Государственный испытательный космодром Министерства обороны Российской Федерации) расположен в 180 километрах к югу от Архангельска неподалеку от железнодорожной станции Плесецкая Северной железной дороги. Располагаясь на платообразной и слегка холмистой равнине, он занимает площадь 1762 квадратных километра, простираясь с севера на юг на 46 километров и с востока на запад на 82 километра с центром, имеющим географические координаты 63 градуса северной широты и 41 градус восточной долготы. История космодрома начинается с Постановления ЦК КПСС

и Совета Министров СССР от 11 января 1957 года, когда было принято решение о создании военного объекта с условным наименованием “Ангара” - первого соединения межконтинентальных баллистических ракет “Р-7”. В том же году началось строительство первых стартовых комплексов.

Первый космический старт в Плесецке состоялся 17 марта 1966 года, когда был осуществлен запуск спутника “Космос-112”. С этого момента началась интенсивная эксплуатация объекта «Ангара», как космодрома. В 1970-80 гг. здесь производилось до 40 % мировых космических запусков. Всего с космодрома Плесецк осуществлено более 1600 запусков РН и выведено на орбиту свыше 1950 КА, в том числе военного назначения. Из этого количества 49 пусков были аварийными. Количество пусков по годам существенно варьируется в зависимости от целей запусков, задач, решаемых выводимыми на орбиту КА, безотказности и ресурса бортовой аппаратуры изделий РКТ и других обстоятельств. Максимальное число запусков ракет-носителей в год приходится на 1975-1980 годы прошлого века и составляло от 65 до 70 запусков в год [25, 26]. На космодроме «Плесецк» испытано и принято в эксплуатацию: 10 видов ракет-носителей, 11 ракетных комплексов, более 30 типов КА. За большие заслуги в деле освоения специальной техники и укрепления обороны страны космодром Плесецк награждён орденами Красного Знамени, Трудового Красного Знамени, орденом Суворова А.В.

Характерное для последних лет (после 2000 года) уменьшение числа запусков с космодрома является общемировой тенденцией, которая практически не связана с глобальными кризисными явлениями в мировой экономике или с «застоем» в освоении космического пространства. Одной из основных причин сокращения количества запусков КА является существенное увеличение времени их функционирования. Последнее обусловлено стремительным развитием научно-технического прогресса в областях, связанных с конструированием и производством объектов РКТ. В данном случае можно и нужно упомянуть: об успехах химии и материаловедения, которые обеспечили создание принципиально новых конструкционных материалов, стойких к

воздействиям факторов космического пространства; достижениях теоретиков и специалистов по обеспечению и поддержанию исключительно высокой эксплуатационной надежности ракет-носителей и КА; разработке и доведении до практического применения на изделиях РКТ различных сенсоров, построенных на ранее не применяемых на практике физических принципах и др.

В настоящее время космодром обеспечивает часть российских космических программ, связанных с оборонными, народнохозяйственными, научными и коммерческими пусками непилотируемых космических аппаратов. Одной из основных задач космодрома в современных условиях является экспериментальная отработка в целях модернизации существующих и создания перспективных образцов РКТ, а также развития систем измерений и совершенствования процессов анализа измерительной информации, методов оценки летно-технических характеристик летательных аппаратов.

В состав технических средств космодрома, как комплекса для проведения экспериментальной отработки, входят:

стартовые комплексы с пусковыми установками для всех отечественных ракет-носителей легкого и среднего классов;

многофункциональная заправочно-нейтрализационная станция (ЗНС) для заправки ракет-носителей, разгонных блоков и космических аппаратов компонентами ракетного топлива и сжатыми газами, нейтрализации токсичных веществ;

семь монтажно-испытательных корпусов для сборки и испытаний ракетно-космической техники (технические комплексы подготовки ракет космического назначения и космических аппаратов);

кислородно-азотный завод;

измерительный комплекс, включающий в свой состав шесть измерительных пунктов на территории и за пределами космодрома и информационно-вычислительный центр;

аэродром первого класса, позволяющий эксплуатировать воздушные суда с максимальной посадочной массой до 220 тонн для доставки на космодром космических аппаратов с территориально удаленных заводов-изготовителей;

более 600 км транспортных магистралей: сеть автомобильных дорог — 301,4 км и железнодорожных путей — 326 км;

системы связи, электро- и водоснабжения.

Для осуществления и координации деятельности по экспериментальной отработке ракетно-космических комплексов (РКК), запускам ракет-носителей с КА, проведением и обработкой телеметрических и траекторных измерений на космодроме сформированы следующие структурные подразделения [25]:

1-й Центр. Он предназначен для испытания РКК легкого класса и проводит подготовку и запуск КА связи, геодезии, навигации и научных аппаратов.

2-й Центр. Он предназначен для испытания и применения РКК среднего класса. Он проводит подготовку и запуск связных спутников, аппаратов природно-ресурсного мониторинга, космического материаловедения и биологических исследований.

3-е Управление. Оно обеспечивает телеметрическими и траекторными измерениями запуски с космодрома всех объектов РКТ.

4-й Центр. Он предназначен для испытания ракетных комплексов межконтинентальных баллистических ракет мобильного и стационарного базирования. В его составе пусковые установки шахтного типа, стартовые и технические позиции

Информационно-аналитический центр. Проводит обработку и анализ результатов всех наземных и летных испытаний, а также баллистического обеспечения пусков.

Научно-испытательный центр представления и контроля информации. Задачами этого подразделения являются: представление материалов об испытаниях российских стратегических ракет; контроль за испытаниями стратегических наступательных вооружений США.

Схема расположения объектов космодрома «Плесецк» представлена на рис. 15.1 (Изображение взято с CD-ROM "Современные отечественные ракеты-носители", Copyright © Компания "МЕГАРУСС", 1997. Электрон. дан. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

На схеме введены обозначения: ПУ- пусковая установка, СК –стартовый комплекс, ТК-технический комплекс, ИП измерительный пункт, КАЗ – кислородно-азотный завод, ЗНС - заправочно-нейтрализационная станция.

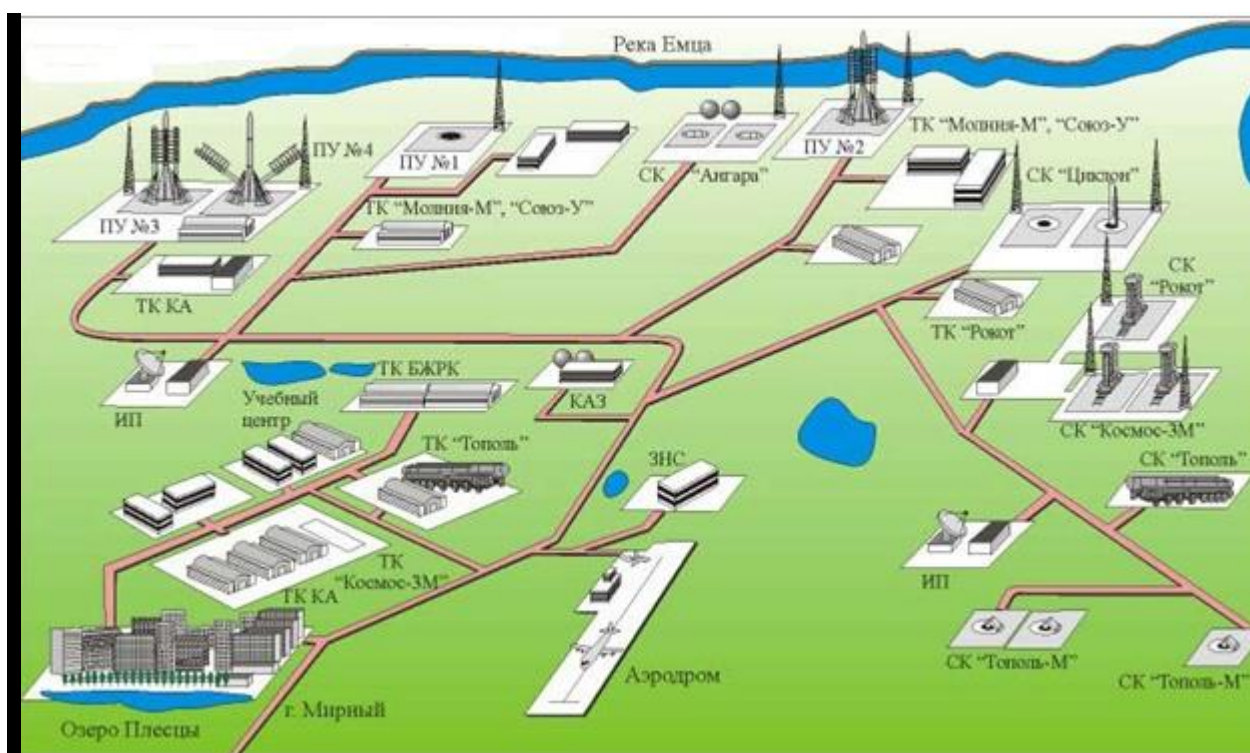


Рис. 15.1. Схема расположения объектов инфраструктуры космодрома «Плесецк»

Доставки на космодром КА и частей ракеты-носителя, как правило, осуществляется железнодорожным или авиационным транспортом. После завершения в соответствующем ТК (МИК) наземных испытаний ракеты-носителя и КА они стыкуются и доставляются на СК, где устанавливаются в вертикальное положение. На СК проводится заправка ракеты-носителя компонентами топлива, осуществляются последние комплексные проверки ракеты-носителя и КА. В случае благополучного исхода проверок проводят запуск ракеты-носителя.

В процессе выведения КА на орбиту с заданными параметрами с помощью радиотехнических средств ИП в измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) космодрома передается телеметрическая информация о состоянии ракеты-носителя и КА. Эта информация может непосредственно передаваться на обработку в ИВК или же записываться на различные носителя для последующей обработки и анализа. В процессе выведения КА и при его использовании по назначению сретсва ИП проводят траекторные измерения параметров движения ракеты-носителя и КА. Анализ этой информации позволяет судить о соответствии траектории движения объектов РКТ заданным параметрам и своевременно вырабатывать решения о необходимости проведения корректирующих мероприятий. Для этого на объекты РКТ с помощью радиотехнических средств ИП, расположенных вдоль проекции на Землю заданной траектории движения, передается командная информация. Полученная в ходе запуска и эксплуатации КА на орбите информации обязательно архивируется, обрабатывается и анализируется для выработки корректирующих мероприятий, направленных на достижение заданного качества экспериментальной отработки изделий РКТ.

Описанная циклограмма процессов функционирования космодрома обеспечивает возможность эффективного решения задач экспериментальной отработки изделий РКТ при выполнении следующих условий [29]:

наличие высококвалифицированных коллективов испытателей изделий РКТ;

наличие совершенной экспериментальной базы, позволяющей воспроизводить реальные условия эксплуатации изделий РКТ в условиях открытого космоса, проводить различные виды испытаний и осуществлять запуски с помощью ракет-носителей различного класса;

возможность всестороннего и глубокого анализа информации, получаемой в ходе экспериментальной отработки и летных испытаний, для формирования комплекса корректирующих мероприятий, направленных на устранение выявленных в ходе испытаний недостатков;

наличие эффективных и постоянно совершенствующихся методик проведения различных видов испытаний изделий РКТ;

развитая инфраструктура космодрома, обеспечивающая минимизацию влияния человеческого фактора на процессы экспериментальной отработки за счет реализации комплексного подхода к решению социальных проблем работников и служащих космодрома.

Список источников информации

1. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем / Л.Н. Александровская и др.: Учебное пособие. - М.: Логос, 2003. -736с.
2. ГОСТ 16504-81 «Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.»
3. Экспериментальная отработка космических летательных аппаратов / Под редакцией Н.В. Холодкова. – М.: Издательство МАИ, 1994. - 412с.
4. Андрейчук О.Б., Малахов Н.Н. Тепловые испытания космических аппаратов. - М.: Машиностроение, 1982, 143 с.

5. Баженов В.И., Осин М.И., Захаров Ю.В. Моделирование основных характеристик и процессов функционирования космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1985.
6. Вакуумная техника: Справочник. / Под общей ред. Е.С. Фролова, В.Е. Минайчева. – М.: Машиностроение, 1975, - 360 с.
7. Колесников А.В., Сербин В.И. Моделирование внешнего теплообмена космических аппаратов. – М.: «Информация – XXI век», 1997, - 170 с.
8. Колесников А.В. Лекции по курсу «Испытания конструкций и систем космических аппаратов». - М.: МАИ, 2007. -147с. [Электронный ресурс]: офиц.сайт URL <http://airspot.ru/library/book/>, (дата обращения: 27.09.2016).
9. Космонавтика: Энциклопедия / Под ред. В.П. Глушко –М.: Сов. Энциклопедия, 1985. - 528 с.
10. Околоземное космическое пространство. / Справочные данные под ред. Ф.С. Джонсона. Пер. с англ. – М.: Мир, 1966. – 191 с.
11. Методические указания по расчету и проектированию акустических камер для измерения шумовых характеристик машин/ Библиотека нормативно-правовых актов СССР. - М.: Госстандарт, 1978 г. -94с.
13. Центра научно-технической информации «Нормоконтроль» с открытой базой ГОСТов [Электронный ресурс]: офиц.сайт URL <http://standartgost.ru> (дата обращения: 27.11.2016).
14. Александровская Л.Н. и др. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем. – М.: Логос, 2001. -208с.
15. Вибрации в технике. Справочник. Т. 1-6. Под ред. Челомея В.Н. – М.: Машиностроение, 1981. -2710с.
16. Городецкий В.И. Элементы теории испытаний и контроля технических систем. –Л.: Энергия, 1978. -192с.
17. Инженерные методы исследования ударных процессов / Под ред. Батуева Г.С. – М.: Машиностроение, 1977. -240с.
18. Испытательная техника. Справочник в 2-х кн. /Под ред. Клюева В.В. – М.: Машиностроение, 1982. – 1118с.

19. Недайвода А.К. Факторы и условия полета ракетной и космической техники. – М. МГАТУ, 1995. -265с.
20. Судаков Р.С. Испытания технических систем. – М.: Машиностроение, 1988. - 272с.
21. Экспериментальная баллистика ракетно-космических комплексов. / Под ред. Лысенко Л.Н. – М.: Военная академия РВСН им. Перта Великого, 2000.
22. Проектирование испытательных стендов для экспериментальной отработки объектов ракетно-космической техники / А.Г. Галеев, Ю.В. Захаров, В.П. Макаров, В.В. Родченко. – М.: Издательство МАИ, 2014. – 283 с.
23. Информационно-технический бюллетень АО «ОДК-Пермские моторы» (входит в состав АО «Объединенная двигателестроительная корпорация»), №28, июль 2013.
24. Крат С.А. и др. Тепловакуумные испытания космического аппарата: опыт создания имитатора солнечного излучения на основе современных газоразрядных ламп высокого давления. -Красноярск, Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева, №2, 2010. с.73-76.
25. Северный космодром России. Т.1. / Под общ. Ред. А.А. Башлакова. – Мирный: космодром «Плесецк», 2007. -568с.
26. Всемирная энциклопедия космонавтики. В 2-х кн./ Под общей редакцией Перминова А.Н. – М.: Энциклопедия, 2002, 2011. – 1124с.
27. Энциклопедия Машиностроение. В сорока томах. Том XXL: Оборудование, материаловедение, механика. / Главный редактор: Фролов К. В. – М.: Машиностроение, 1994 - 2013 г.г.
28. Компания MSH Techno - лидер на российском рынке современной вакуумной и компрессорной техники, оборудования для исследований и наукоемких производств [Электронный ресурс]: <http://www.msht.ru> (дата обращения: 17.21.2016).

29. Федерации космонавтики России – Общероссийская общественная организация [Электронный ресурс]: офиц. сайт. URL <http://fkrus.ru>, (дата обращения: 17.11.2016).