

Глава 1

ЭКСПЕРИМЕНТ И ИСПЫТАНИЯ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ. ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД КАК ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОСНОВА ЭКСПЕРИМЕНТА

Испытания, эксперимент, экспериментальные исследования, контроль, технический контроль, сертификация – это далеко не полный перечень основополагающих терминов, которыми широко оперируют специалисты в различных производственных и научных областях при контроле и оценке уровня качества той или иной продукции.

Перечисленные термины уже определены в соответствующих стандартах или других нормативных документах. Более того, практически любой специалист, работающий в сфере оценки или контроля качества продукции, безапелляционно заявит, что нет в теории контроля качества и испытаний «белых пятен», все достаточно проработано и изучено. Но авторы настоящей книги с достаточной степенью уверенности считают, что несмотря на достаточную изученность проблемы в широком понимании этих терминов вопросы экспериментальных исследований, испытаний и контроля качества на различных стадиях создания выпускаемой продукции требуют более внимательного рассмотрения и изучения.

Предлагаемые в данной книге подходы к общей проблеме качества и испытаний позволят вплотную, с точки зрения авторов, подойти к разработке единых основ теории испытаний и научного эксперимента.

По мнению авторов, именно, опираясь на научный и практический опыт испытательной практики, накопленный в космической отрасли, можно будет выстроить основы прикладной научной дисциплины, которая уже давно в трудах многих ученых получила название теория испытаний.

1.1. Различие понятий «эксперимент» и «испытание» и их взаимосвязь

Испытания как вид человеческой деятельности являются одним из древнейших инструментов человека для познания окружающего мира. В одной из книг Библии – книге «Бытия» – испытание как мысленный эксперимент упоминается намного раньше, нежели какое-либо из ремесел. Но несмотря на такую историю сегодня даже среди специалистов в области экспериментальных исследований нет однозначного понимания содержательной части терминов «экспериментальная отработка», «испытания», «сертификация», «верификация», «валидация».

Не претендуя на строгость и основываясь скорее на научно-технических и практических понятиях, назовем *научным экспериментом (экспериментом)*

спланированный вид человеческой деятельности, имеющий целью получение необходимой информации об объекте исследований, процессе, явлении.

Испытания в соответствии с определением, установленным ГОСТ 16504–81, удачно вписываются в понятие эксперимент как его основная, существенная часть. Два этих важнейших для теории испытаний понятия: «эксперимент» и «испытание» взаимно увязываются и весьма удачно складываются в основу научной платформы, на которой и будут базироваться дальнейшие процедуры и построения по проблематике теории испытаний.

Хочется отметить, что наши рассуждения будут неполными, если не коснуться ряда очень важных обстоятельств.

Принципиально важно упомянуть и раскрыть термин «заинтересованные стороны». Конечно, в первую очередь в качестве заинтересованной стороны следует указать заказчика – он в основном и является потребителем продукции или услуги. Например, для оборонной техники в этом качестве прямо или косвенно выступает государство в лице Минобороны.

Далее, безусловно, следует указать исполнителя. Как правило, в этой роли выступают два юридических лица, определенным образом соподчиненных, – разработчик и изготовитель продукции (услуги).

В особом статусе и с определенными функциями и полномочиями в процессе испытаний участвуют и контрольные инстанции, например головные институты отрасли, представительства заказчика.

Сложные по технологии и научно-техническому обеспечению испытания проводятся на специализированных полигонах или стендах научно-испытательных центров. В этом случае появляется еще одна, так называемая третья сторона, не зависящая ни от заказчика, ни от исполнителя. Заключение этой третьей стороны имеет наиболее адекватную основу по причинам более высокой компетенции и независимого характера необходимых процедур по оценке продекларированных изготовителем значений показателей качества.

Как не бывает «чистой» науки, без ориентации на прикладное применение, так не бывает и «чистых», абстрактных, проводимых исключительно в познавательных целях испытаний. Наоборот, всегда присутствует вопрос: в интересах какого субъекта будут использованы результаты испытаний? И очень часто это обстоятельство существенно влияет на ход испытаний. В современной испытательной практике уже прошло то время, когда и вопросы, и ответы ставил и получал один всесторонне доминирующий субъект – разработчик (изготовитель) того или иного объекта или процесса.

Сегодня существует однозначное понимание того обстоятельства, что именно заказчик (потребитель) техники или услуги должен самостоятельно или через привлечение соответствующего профессионального, компетентного органа или института формулировать весь объем и номенклатуру требований к тому или иному объекту разработки или совершенствования и опре-

делять условия сдачи-приемки продукции или процесса. Такой подход позволяет отказаться от широко используемой ранее и сохранившейся в настоящее время практики «патронированных» со стороны разработчика (изготовителя) приемосдаточных испытаний, характеризующихся обилием «выявленных» тех или иных замечаний, подлежащих устранению в последующем. Так называемый условно положительный результат испытаний существенно снижает значимость экспериментальной отработки и в итоге приводит к печальной статистике аварийных пусков ракет-носителей (РН).

Ракетно-космическая промышленность России обоснованно гордится надежностью отечественных ракет-носителей. РН класса «Союз» справедливо считаются мировым эталоном надежности. По крайней мере, так было до недавнего времени. Однако в последнее время ракетно-космическая отрасль переживает череду неудач. С декабря 2010 по август 2011 г. потеряны шесть космических аппаратов, запущенных тремя различными РН: «Протон-М», «Рокот» и «Союз-У».

Опыт создания РКТ показывает, что на уровень ее качества и надежности влияют работы на всех этапах жизненного цикла, но основы надежности определяются совокупностью экспериментальных и испытательных работ на этапах отработки в ходе выполнения опытно-конструкторских работ (ОКР) и на этапах серийного производства. Мировая практика свидетельствует о том, что затраты на проведение испытаний создаваемой РКТ на наземных экспериментальных установках, включая создание экспериментальной базы, составляют от 50 до 80 % общих затрат. Столь высокие затраты подтверждают важность как экспериментальной базы, так и самого порядка выполнения испытаний в процессе создания РКТ.

В качестве примера эффективной экспериментальной отработки можно привести создание ракетно-космической системы «Энергия» – «Буран», для отработки и испытаний узлов, агрегатов, двигательных установок которой были созданы и использованы почти 190 объектов стендовой базы. К первому летному испытанию РН «Энергия» было создано более 200 экспериментальных установок для отработки рабочих процессов и конструкции узлов и агрегатов системы, 34 крупногабаритные конструктивные сборки, собрано 5 полноразмерных экземпляров РН «Энергия». Общее число проведенных испытаний превысило 6500, а модульная часть блока «А» успешно прошла 6 летных испытаний при пусках РН «Зенит». Стендовая база для отработки узлов, агрегатов и всех составляющих ракетно-космической системы обеспечила в полном объеме имитацию внешних воздействий на них, в результате чего было обеспечено успешное проведение уже двух первых летных испытаний системы.

Другая важнейшая составляющая обеспечения надежности РКТ – контроль качества ее изготовления при поставках в эксплуатацию. В процессе серийного производства жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) и жидкост-

ных ракетных двигательных установок (ЖРДУ) контроль качества изготовления ведется по результатам приемочных, предварительно-приемочных, периодических и специальных испытаний, которые представляют собой стендовые огневые испытания. Однако в последнее время ранее эффективная система начала давать сбои, интенсивность которых эпизодически возрастает до неприемлемых значений.

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

Оценка качества ракетно-космической техники является крайне сложной задачей в виду как сложности самих изделий РКТ и экстремальных режимов их работы, так и многообразия интересов разработчиков, изготовителей и потребителей последней. Поэтому невозможно предложить одну универсальную меру оценки качества. Приходится использовать ряд характеристик, охватывающих весь спектр предъявляемых требований.

Никакими системами самого жесткого контроля, основанными на визуальном восприятии, анализе результатов контрольных испытаний и субъективной оценке состояния объектов разработок, не удастся создать адекватную систему верификации и валидации.

Результаты научно-исследовательских работ, проведенных в последнее время, дают основание полагать, что наиболее эффективным инструментом в области теории испытаний является использование энтропийных критериев и основных положений теории информации. Основой должен быть непрерывный мониторинг, базирующийся на электронных информационных базах данных, включающих в себя в том числе и информационно-диагностические образы объектов испытаний.

Поэтапный мониторинг состояния разработки, испытаний и контроля качества будет выполняться с использованием своеобразного «единого виртуального паспорта» соответствующего ЖРД (двигательной установки). «Единый виртуальный паспорт» может рассматриваться как одно из направлений реализации CALS-технологии (Continuous Acquisition and Life cycle Support), предусматривающей информационную поддержку жизненного цикла (ЖЦ) соответствующего изделия как совокупности инвариантных (по отношению к продукции, предприятию или отрасли промышленности) принципов, управленческих технологий и технологий управления данными (информационных технологий), реализуемой в интегрированной информационной среде. Интегрированная информационная среда объединяет информационные процессы всех участников ЖЦ изделия на основе международных стандартов, регламентирующих унифицированные модели данных и соглашения о способах обмена этими данными.

Все то, что излагалось выше, крайне необходимо и чрезвычайно важно для совершенствования экспериментальной базы ракетно-космической промышленности. В отношении развития отечественной экспериментальной базы следует обратить внимание на главное – экспериментальная база любой из отраслей перерастает, выходит из своих границ. Будущее остается исключительно за межведомственными Центрами коллективного пользования. Именно такие центры, находящиеся исключительно в государственном ведении, позволят осуществлять целесообразную во всех отношениях политику государства в области контроля качества и экспериментальной оценки всей вновь создаваемой и серийно выпускаемой техники, приоритетной с точки зрения государственных интересов. В США, например, экспериментальная база официально объявлена общегосударственным достоянием, и на этой основе определены ее статус, принципы функционирования и финансирования.

Система испытаний, сложившаяся в ракетно-космической промышленности, представляет собой очень сложную систему со всеми присущими такой системе особенностями.

Рассмотрим отдельные элементы системы испытаний.

Испытания как основная форма контроля изделий представляют собой экспериментальное определение количественных и качественных показателей свойств изделия как результата воздействия на него при функционировании изделия, а также при моделировании объекта.

Цели испытаний различны на различных этапах проектирования и изготовления изделий.

При определении понятия «испытание» надо отталкиваться не от английского термина «test» (у которого, как известно, много значений), а от традиционных норм русского языка. Согласно этим нормам испытание всегда предполагает какое-либо воздействие или нагрузку. Испытание проходит либо не проходит.

Испытания – это разновидность контроля. В систему испытаний входят следующие основные элементы:

объект испытаний – изделие, подвергаемое испытаниям;

условия испытаний – совокупность воздействующих факторов и (или) режимов функционирования объекта при испытаниях. Условия испытаний могут быть реальными или моделируемыми;

средства испытаний – технические устройства, необходимые для проведения испытаний. Сюда входят средства измерений, испытательное оборудование и вспомогательные технические устройства;

исполнители испытаний – персонал, участвующий в процессе испытаний. К персоналу предъявляются требования по квалификации, образованию, опыту работы и другим критериям;

нормативно-техническая документация на испытания, которую составляют комплекс стандартов, регламентирующих организационно-методические

и нормативно-технические основы испытаний; комплекс стандартов системы разработки и постановки продукции на производство; нормативно-технические и технические документы, регламентирующие требования к продукции и методам испытаний; нормативно-технические документы, регламентирующие требования к средствам испытаний и порядок их использования.

Условия проведения испытаний и перечень контролируемых параметров изделий оговариваются в стандартах и общих технических условиях на изделие.

Все испытания классифицируют по методам проведения, назначению, этапам проектирования, изготовления и выпуска, виду готовой продукции, продолжительности, уровню проведения, виду воздействия, определяемым характеристикам объекта.

По результату воздействия испытания разделяют на **разрушающие и неразрушающие**. Испытания являются разрушающими, если в процессе их проведения применяют разрушающие методы контроля или в результате воздействия внешних факторов испытываемые образцы становятся непригодными для дальнейшего использования. Методы неразрушающего контроля применяют как взамен разрушающих, так и в дополнение к ним. При этом сокращается время анализа отказов, а в ряде случаев более точно устанавливаются место и вид дефекта.

Большинство методов испытаний изделий РКТ является либо разрушающими, либо значительно сокращающими технический ресурс изделий. Кроме того, в связи с уменьшением объема выпуска изделий возникают ситуации, когда объем выборок для разрушающего контроля становится сопоставим с объемом выпуска изделий. Поэтому наиболее широкое применение в практике испытаний получил выборочный метод, который позволяет судить о всей генеральной совокупности изделий по взятой из нее выборке.

Если изделия, входящие в выборку, в полной мере отражают характер и структуру генеральной совокупности, то такая выборка называется представительной или репрезентативной.

По продолжительности все испытания подразделяют на:

нормальные испытания – испытания, методы и условия проведения которых обеспечивают получение в необходимом объеме информации о показателях надежности изделия за такое же время, что и при эксплуатации;

ускоренные испытания – испытания, методы и условия проведения которых обеспечивают получение необходимой информации о качестве изделия в более короткий срок;

сокращенные испытания – испытания, которые проводят по сокращенной программе.

По назначению испытания можно разделить на исследовательские и контрольные. **Исследовательские испытания** проводят для изучения определенных характеристик свойств изделия. Результаты этих испытаний служат для решения следующих задач:

определение или оценка показателей качества функционирования испытываемых изделий в определенных условиях эксплуатации;

выбор оптимальных режимов работы и показателей надежности;

сравнение множества вариантов реализации изделия при проектировании и аттестации;

построение математической модели функционирования изделия (оценки параметров математической модели);

отбор существенных факторов, влияющих на показатели качества функционирования.

Исследовательские испытания при необходимости проводят на любых стадиях жизненного цикла продукции.

Испытания, проводимые для контроля качества объекта, называются **контрольными**. Назначение контрольных испытаний – проверка на соответствие техническим условиям при изготовлении. Контрольные испытания составляют наиболее многочисленную группу испытаний.

Цели и задачи испытаний изменяются в течение жизненного цикла изделия. В связи с этим понятно подразделение испытаний в соответствии с этапами жизненного цикла. На указанных этапах проводят доводочные, предварительные и приемочные испытания.

Так, **доводочные (исследовательские) испытания** проводятся при проектировании изделий в целях оценки влияния вносимых в техническую документацию изменений, чтобы обеспечить достижение заданных значений показателей качества. Необходимость доводочных испытаний определяет разработчик либо при составлении технического задания на разработку, либо в процессе разработки; он же составляет программу и методику испытаний. Испытаниям подвергают опытные образцы продукции.

Предварительные испытания – контрольные для опытных образцов и (или) опытных партий продукции. Их проводят в целях определения возможности предъявления опытного образца на приемочные испытания. Программа предварительных испытаний максимально приближена к условиям эксплуатации изделия. Организация проведения испытаний такая же, как у доводочных испытаний. По результатам испытаний оформляют акт, отчет и определяют возможность предъявления изделия на приемочные испытания.

Приемочные испытания также являются контрольными для опытных образцов, опытных партий продукции или единичных изделий. Приемочные испытания опытного образца проводят в целях определения соответствия продукции техническому заданию, требованиям стандартов и технической документации, оценки технического уровня, определения возможности постановки продукции на производство.

Испытания готовой продукции подразделяют на квалификационные, приемосдаточные, периодические, типовые, инспекционные, сертификационные.

Квалификационные испытания проводят в следующих случаях: при оценке готовности предприятия к выпуску конкретной продукции, если изготовители опытных образцов и серийной продукции разные, а также при постановке на производство продукции по лицензиям и продукции, освоенной на другом предприятии. В остальных случаях необходимость проведения квалификационных испытаний устанавливает приемочная комиссия. Испытаниям подвергают образцы из установочной (первой промышленной) партии, а также первые образцы продукции, выпускаемой по лицензиям и освоенной на другом предприятии. В состав этих испытаний включают все виды испытаний, предусмотренных в нормативно-технической документации, за исключением проверки сохраняемости.

Приемодаточные испытания проводят для принятия решения о пригодности продукции к поставке или ее использованию. Испытаниям подвергают каждую изготовленную единицу или выборку из партии.

Периодические испытания проводят в целях:

периодического контроля качества изделий;

контроля стабильности технологического процесса в период между очередными испытаниями;

подтверждения возможности продолжения изготовления изделий по действующей документации;

подтверждения уровня качества изделия, выпущенного в течение контролируемого периода;

подтверждения эффективности методов испытаний, применяемых при приемочном контроле.

Периодические испытания предназначены для продукции установившегося серийного (массового) производства.

Типовые испытания – контроль продукции одного типоразмера по единой методике, который проводят для оценки эффективности и целесообразности изменений, вносимых в конструкцию или технологический процесс. Эти испытания являются выборочными, так как относятся к разрушающим испытаниям и предназначены для оценки стойкости конструкции при различных видах механических и климатических воздействий.

Инспекционные испытания – это особый вид контрольных испытаний. Их осуществляют выборочно в целях контроля стабильности качества образцов готовой продукции, находящейся в эксплуатации.

Сертификационные испытания – элемент системы мероприятий, направленных на подтверждение соответствия фактических характеристик изделия требованиям нормативно-технической документации. Сертификационные испытания, как правило, проводят не зависящие от производителя испытательные центры. По результатам испытаний выдается сертификат или

знак соответствия изделия требованиям нормативно-технической документации. Сертификация предполагает взаимное признание результатов испытаний поставщиком и потребителем.

Помимо испытаний, проводимых изготовителем, изделия могут подвергаться проверке при входном контроле у потребителя. При входном контроле не должны осуществляться термоудары, термоциклы, длительная вибрация, механические удары, проводиться многократные проверки изделий испытательным напряжением. Недопустимы проверки изделий в режимах, отличающихся от указанных в технических условиях. Используемая при входном контроле измерительная, испытательная аппаратура и стенды должны соответствовать требованиям на аналогичную аппаратуру и стенды поставщика.

В зависимости от характера воздействия на изделия все внешние воздействующие факторы (ВВФ) разделяются на классы: механические, климатические и другие природные, биологические, радиационные, электромагнитные.

Следует отметить, что повышение эффективности контроля процесса проектирования и технологического процесса изготовления изделий приводит к снижению роли испытаний готовой продукции. Хорошо организованный автоматизированный контроль технологического процесса производства позволяет сократить объем испытаний готовых изделий. Учитывая необходимость оптимизации стоимости изделия, следует находить разумный компромисс между объемом испытаний и эффективностью контроля изготовления изделий.

Разделение системы на элементы – процедура условная и производится на том уровне, на котором удобно ее рассматривать для решения конкретной задачи. Условность разделения системы на элементы состоит еще и в том, что любой элемент, в свою очередь, может рассматриваться как система. В связи с этим, рассматривая многие свойства и характеристики элементов и систем, в тех случаях, когда нет необходимости подчеркивать свойства, присущие только системам или только элементам, будем говорить об объектах. В качестве объекта может рассматриваться система, подсистема или элемент.

Объект – это предмет определенного целевого назначения, рассматриваемый на этапах проектирования, производства, эксплуатации, изучения, исследования и испытаний на надежность. Объектами могут быть системы и их элементы, в частности технические изделия, устройства, аппараты, приборы, их составные части, отдельные детали и т.д.

Первичным по отношению к понятию «надежность» является понятие «качество».

Качество объекта – совокупность свойств и признаков, определяющих пригодность объекта для удовлетворения определенных потребностей в соответствии с его назначением и выражающих его специфику и отличие от других объектов.

Надежность – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования.

Общей характеристикой показателей надежности является то, что они имеют вероятностную природу и характеризуют вероятность наступления определенного события или выполнения заданных требований. Возможны оценки надежности средним значением контролируемой случайной величины, дополненным доверительными границами. Оценки надежности дают достаточно полное представление о качестве (эффективности) функционирования технического объекта (системы) в определенных условиях эксплуатации – нормальных условиях. С понятием «надежность» связаны ресурсные испытания.

Ресурсные испытания проводят для определения ресурса надежности объекта. Они являются либо продолжением испытаний на долговечность, либо самостоятельными испытаниями. Ресурсные испытания проводят, как правило, в режимах и условиях, установленных для испытаний на долговечность. В процессе ресурсных испытаний измеряют параметры (критерии годности) через определенные интервалы времени и регистрируют время появления отказов. Испытания проводят до определенного числа отказов, установленного программой. На этапе опытно-конструкторской работы и при модернизации конструкции или технологии целесообразно проводить ресурсные испытания изделий, включающие в себя испытания на долговечность, сохраняемость, а также периодические испытания, проводимые в целях оценки качества и надежности изделий при сравнении различных конструктивно-технологических решений в процессе модернизации изделий. На основании ресурсных испытаний принимается решение по улучшению качества и повышению надежности.

Вернемся к взаимосвязи терминов «испытание» и «эксперимент». Термин «эксперимент», по нашему мнению, тяготеет в большей степени к научной проблематике и относится, скорее, к научной составляющей деятельности человека. В науке известно и такое понятие как «мысленный эксперимент», когда какое-либо действие осуществляется не с физическими объектами, а с их математическими образами. К этой категории можно отнести понятия «математическое моделирование», «компьютерные, суперкомпьютерные модели испытаний и изделий».

В то же время реальное наполнение испытаний на практике сильно зависит от мотивов и интересов субъектов испытательной практики. «Чистые» испытания, спланированные в виде абстрактных, сугубо физических обстоятельств, без учета экономических и временных факторов, технического уровня участников процесса, а также особенностей испытательных средств,

реализовать вряд ли возможно. Поэтому уже в определении терминов необходимо учитывать мотивы и пожелания всех субъектов испытательной практики: потребителя, разработчика, производителя, а также субъекта, осуществляющего независимый контроль уровня качества и технического уровня продукции или технологического процесса.

1.2. Роль испытаний в жизненном цикле сложных научно-технических систем с точки зрения информационно-энтропийного подхода

Отметим еще одно важное обстоятельство. При проведении испытаний основной доминантой, на которую направлено все внимание субъектов испытаний, является *информация*. В первоначальном виде информация представляет собой набор эмпирических данных того или иного вида, а далее, по мере последующих действий, идет трансформация основных данных в конкретную информацию об объекте или явлении. По мере дальнейшего анализа, обработки и сопоставления полученных данных с априорными и нормативными информация трансформируется в полновесные знания, получение которых собственно и является конечной целью процесса испытаний, как и любого процесса познания. Нам кажется, что научный подход к изучению, планированию и оценке экспериментальных исследований на методологической и познавательной и инвариантной основе позволит более строго и результативно изучать и систематизировать научные и практические аспекты экспериментальных исследований в целом и испытательной практики в частности.

Ракетно-космическая техника и технологические процессы, обеспечивающие весь ее жизненный цикл, основаны на научных, производственных, людских и прочих видах ресурсов страны и их взаимосвязей. С точки зрения научного описания этих процессов они могут быть отнесены к сложным динамическим системам, которые достаточно хорошо изучены и изложены выдающимися учеными А. Пуанкаре, И.Р. Пригожиным, К. Шенноном, Л. Бриллюэном, У. Эшби, А.Н. Колмогоровым, А.М. Ляпуновым и многими другими [1]. Активные исследования в данном направлении продолжаются в настоящее время [2].

В кратком изложении полученные ими результаты заключаются в следующем.

В отношении любой сложной динамической системы действуют фундаментальные физические законы эволюции от прошлого к будущему. В основе этих законов лежит понятие энтропии, определяемой, например, в статистической физике как мера необратимого рассеяния энергии, а в теории информации как мера неопределенности сообщения (опыта, испытания), которое может иметь разные исходы.

Изолированная от «внешнего» мира система эволюционирует к равновесному состоянию (состоянию термодинамического равновесия, хаоса), связан-

ному с исчезновением порождающих ее причин и характеризующемуся максимальной энтропией. Открытые системы функционируют вдали от термодинамического равновесия за счет ресурсов (энергии, информации и т.д.), поступающих извне. Открытая система может находиться в стационарном состоянии, при котором энтропия системы не изменяется. Изменение энтропии открытой системы $\Delta\mathcal{E}$ во времени связано с взаимодействием вкладов двух типов: «потока энтропии» $\Delta\mathcal{E}_1$, зависящего от обмена системы с окружающей средой, и «производства энтропии» $\Delta\mathcal{E}_2$, обусловленного необратимыми процессами внутри самой системы:

$$\Delta\mathcal{E} = \Delta\mathcal{E}_1 + \Delta\mathcal{E}_2$$

Поскольку для любой системы $\Delta\mathcal{E}_2 \geq 0$, то общее уменьшение энтропии открытой системы (повышение степени организованности) возможно лишь за счет роста энтропии окружающей среды, т.е. отрицательного значения составляющей $\Delta\mathcal{E}_1$.

В стационарном состоянии положительное производство энтропии внутри системы компенсируется отрицательным потоком энтропии извне, т.е. активность, производящая энтропию и фактически ведущая к деградации системы, постоянно нивелируется за счет обмена с окружающей средой: $\Delta\mathcal{E} = 0$.

Что происходит, когда интенсивности потока отрицательной энтропии недостаточно для поддержания системы в стационарном состоянии? В этом случае имеет место качественно отличный тип функционирования систем, возникающий на вполне определенных интенсивностях потоков отрицательной энтропии, поддерживающих активность, связанную с производством энтропии. А именно, речь идет о неравновесных диссипативных структурах. Неравновесные связи и ограничения допускают возникновение новых состояний систем, свойства которых резко контрастируют со свойствами равновесных состояний. Согласно теореме о минимальном производстве энтропии, сформулированной И.Р. Пригожиным, стационарное состояние соответствует минимальному производству энтропии, совместимому с данной связью. Однако стоит переступить порог неустойчивости (критический уровень организованности), как ситуация изменяется. В этом случае неравновесная связь уже «не объясняет» производство энтропии, ибо такие системы производят ее больше, чем это следует из теоремы.

Сильно неравновесные ситуации приводят к таким понятиям, как «чувствительность к начальным условиям». Чувствительность связывает определение системы (состав, отношения с окружающей средой, взаимодействие между компонентами и теми следствиями, к которым эти взаимодействия приводят) и вычисление активности (производство энтропии) системы в зависимости от ее удаленности от состояния равновесия. От того, насколько

система далека от равновесия, зависит, как следует описывать отношения системы с окружающей средой.

Понятие «неустойчивость» связано с проблемой чувствительности системы к своим собственным флуктуациям. Системами, в которых неконтролируемые флуктуации могут усиливаться и играть решающую роль, невозможно управлять по своему усмотрению. К числу таких систем относятся и сильнонеравновесные системы. Таким образом, неустойчивость означает, что флуктуации могут перестать быть просто шумом и превратиться в фактор, направляющий глобальную эволюцию системы. То же событие, та же флуктуация могут быть вполне пренебрежимыми, если система устойчива, и стать весьма существенными, если система под действием неравновесных связей переходит в неравновесное состояние.

В критических пороговых точках поведение системы становится неустойчивым. При определенных условиях в системе начинают происходить самоорганизующиеся процессы создания упорядоченных структур, причем система может эволюционировать к нескольким альтернативам, переход к которым носит вероятностный характер и никакое «приращение знания» не позволит определенно предсказать, какую альтернативу выберет система. Чтобы увеличить интервал времени, в течение которого можно предсказать траекторию движения системы, необходимо увеличивать точность, с которой задано начальное состояние. Однако, как показывает теория, затраты на усилия по увеличению прогнозных возможностей носят экспоненциальный характер. *Разумеется, можно изменить данное положение вещей, не увеличивая наше знание о системе, а существенно трансформируя саму систему.*

Первоначально данные результаты были получены для сложных физико-химических систем. Однако в последующем выяснилось, что они носят фундаментальный характер и распространяются на все сложные динамические системы: биологические, социально-экономические, научно-технические, производственно-технологические, программно-алгоритмические, информационные и др.

Предлагается применить энтропийный подход к описанию и анализу жизненных циклов ракетно-космической техники. Реализация и построение всего физического универсума, связанного с разработкой, производством и эксплуатацией изделия РКТ, являются сложнейшей динамической системой, функционирование которой определяется сотнями тысяч переменных и десятками тысяч связей между ее элементами, в подавляющем большинстве нелинейных (рис. 1.1).

То, что данная система является диссипативной, не вызывает сомнений: при отсутствии надлежащего исходящего потока отрицательной энтропии она деградирует, причем достаточно быстро. В качестве примера можно привести проект создания российского кислородно-водородного разгонного

блока 12КРБ. После изготовления и поставки по контракту с Индийским космическим агентством (ИСРО) семи блоков работы по данной тематике были свернуты. Когда через несколько лет ИСРО обратилось в ГКНПЦ им. М.В. Хруничева с просьбой изготовить еще три блока, выяснилось, что сделать их в рамках приемлемых затрат уже невозможно. Оказалась, что практически утрачены технология, оснастка, кооперация изготовителей узлов и элементов, квалифицированные научно-технические кадры. Аналогично обстояло дело и с проектом «Энергия» – «Буран». Реализовать подобный проект в современных условиях крайне трудно.

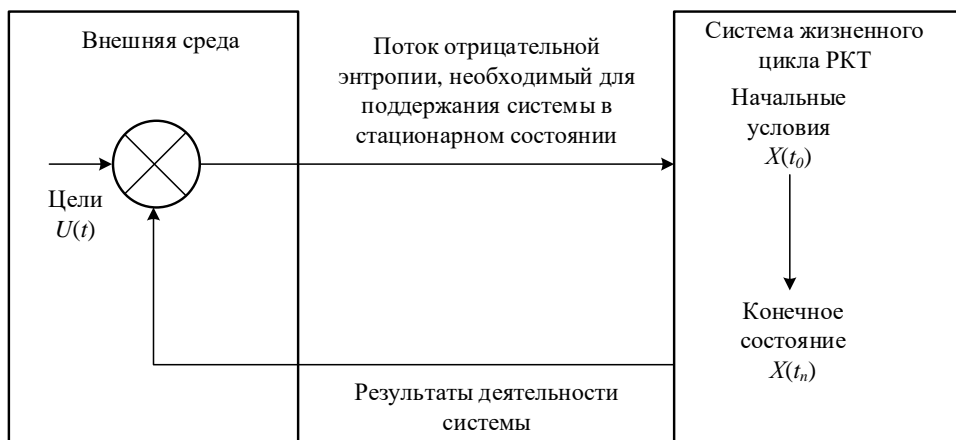


Рис.1.1. Взаимосвязи системы жизненного цикла РКТ и внешней среды с точки зрения энтропийного подхода

Для того, чтобы данная система функционировала как хорошо отлаженный механизм, необходимы (как это было в первые десятилетия таких проектов, как РН «Союз» и «Протон») мощные вливания отрицательной энтропии в виде финансовых, кадровых, технологических, научно-технических поддержек и ресурсного обеспечения. С учетом огромного внимания со стороны государства к ракетной технике на этапе ее создания такое положение представлялось возможным. Неудивительно, что долгие годы системы, определяющие производство и эксплуатацию этих носителей, находились в почти стационарном состоянии.

Со временем, а особенно в последние годы, поток отрицательной энтропии значительно ослабел. Это связано как с объективными, так и с субъективными причинами (роль космических исследований в политике государства значительно снизилась). Объективные причины связаны с оттоком квалифицированных кадров, отсутствием мотивации у научных кадров (все уже разработано), изменениями в технологии и материалах, нарастанием объемов

модернизаций, приводящих к изменениям входных условий функционирования системы. В качестве примера можно привести случай, когда 10–15 лет назад в двигателях РН «Союз» появились существенные вибрации и пульсации в камере сгорания, причину которых долго не могли понять. Как выяснилось, вибрации и пульсации были следствием изменения технологии изготовления форсунок. Возврат к старой технологии (ретро-технологии) вернул вибропульсационное состояние к прежнему уровню.

Снижение потока отрицательной энтропии и объективное изменение начальных условий (многим проектам уже более 50 лет) неизбежно приведут к тому, что системы производства изделий РКТ из стационарного состояния перейдут в неустойчивое, чувствительное к начальным условиям состояние (рис. 1.2).

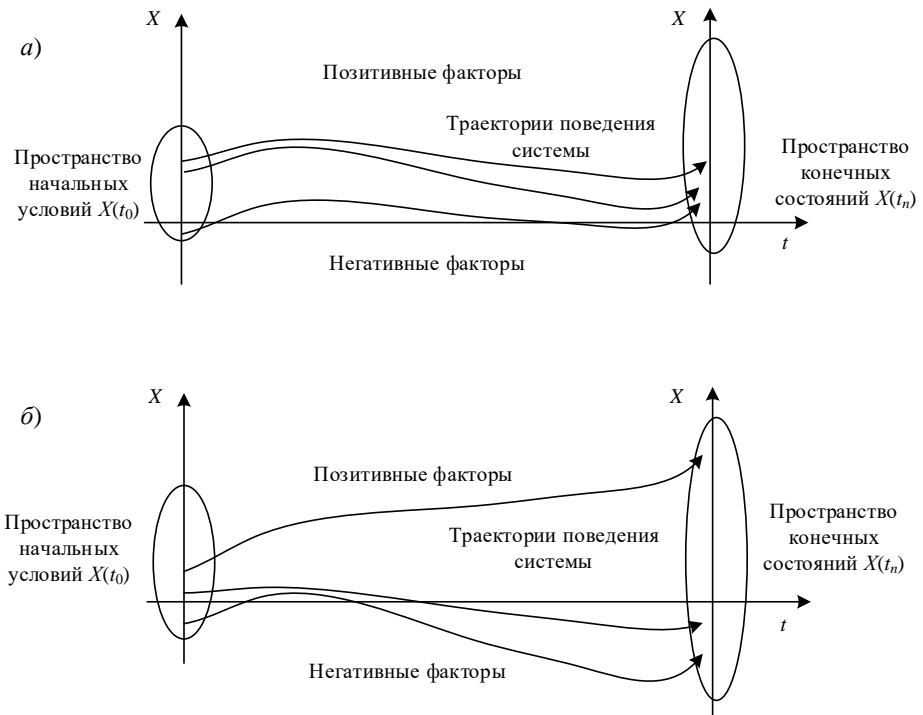


Рис. 1.2. Влияние начальных условий и флуктуаций внутренних и внешних факторов на поведение стационарных (а) и неустойчивых (б) систем. Для последних характерны более размытое пространство начальных условий и непредсказуемая траектория эволюции

Как было показано выше, для неустойчивых, чувствительных к начальным условиям систем никакие усилия в области повышения эффективности контроля качества, целью которых как раз и является уточнение начальных условий, не помогут. Во-первых, контроль качества изделий РКТ охватывает

только малую часть входных параметров. Во-вторых, поскольку система уже вошла в неустойчивое, чувствительное к малейшим изменениям начальных условий состояние, любой фактор (по большей части человеческий или технологический – например, неправильно установили датчик, перелили топливо в баки при заправке, не сняли фаски с отверстий и т.п.) может привести к непредсказуемым последствиям.

Еще одним фактором, изначально приводящим систему в неустойчивое состояние, является срок разработки. Прежние ракеты-носители разрабатывались очень быстро. От начала проектирования до начала эксплуатации проходило несколько лет (3–5). За это время начальные условия не претерпевали существенных изменений. Растягивание сроков разработки (например, разработка РН «Ангара» продолжается уже 20 лет) приводит к существенному изменению начальных условий – работы начинаются при одном уровне развития науки и техники, а заканчиваются при другом. В условиях существенно ограниченного потока отрицательной энтропии данное обстоятельство делает систему изначально неустойчивой. Решения морально устаревают, не успев воплотиться в жизнь.

Показательным примером может быть создание первой ступени РН «Союз-2-1в». В ЦСКБ – «Прогресс», сделав ставку на молодых конструкторов, создали ступень за три года. В конце 2013 г. она успешно прошла первые летные испытания. Кроме того, на том же предприятии ведется работа по подготовке научных кадров совместно с Самарским государственным аэрокосмическим университетом (показателен тот факт, что NASA поручило изготовление новых ракет двум частным фирмам, которые также очень быстро и эффективно их создали и успешно эксплуатируют).

Данная книга посвящена испытаниям изделий ракетно-космической техники, также представляющим собой сложную динамическую систему, входящую как подсистема в системы создания, производства и эксплуатации изделий РКТ. Такая трактовка позволяет определить дисциплинарную принадлежность испытаний как прикладную науку, занимающую срединное положение между теорией и производством технических средств и устройств. Не претендуя на терминологическую строгость, хотелось бы *содержание термина «испытание» определить как вид человеческой деятельности, связанный с ресурсными и умственными затратами и направленный на получение знаний и сведений об объектах и (или) процессах для формирования выводов и прогнозов по их использованию или совершенствованию.*

Любые испытания независимо от условий и программ их проведения в широком понимании этого термина по сути являются разновидностью моделирования. Даже натурные испытания, максимально приближенные к реальным условиям применения или эксплуатации объектов, все же имеют значительное число отличий, ограничений, упрощений или допущений по отношению к реальным условиям эксплуатации.

Принимая в такой форме содержательную основу испытаний, можно утверждать, что *построить эффективную систему испытаний возможно только в том случае, если удастся обеспечить достаточный уровень эквивалентности воздействующих факторов и параметров внешней среды, создаваемых при испытаниях, реальным условиям эксплуатации, а также обеспечить физическую идентичность объектов испытаний натурным образцам.*

Таким образом, мы подошли к важности определения критериев подобия испытательных режимов и внешних воздействующих факторов при эксплуатации.

Не вдаваясь глубоко в различные подходы к решению этого вопроса, отметим, что адекватность лабораторных, стендовых испытаний внешним воздействующим факторам в условиях эксплуатации достигается на основе эквивалентности механизмов повреждающей способности испытательных режимов и реальных, натуральных воздействий [3]. Изучение таких механизмов – это отдельная глубокая тема, и мы пока оставим ее без детального рассмотрения. Отметим лишь, что на практике эта проблема решается воспроизведением в лабораторных условиях и на стендовых комплексах *возможно полной номенклатуры воздействующих факторов внешней среды, имеющих максимальную повреждающую способность.*

Методологическая основа и в целом вся практическая сторона испытательной практики сегодня достаточно глубоко проработаны. Испытания описаны, классифицированы и нормированы в различной нормативной и технической документации по видам, объектам, условиям проведения, видам внешних воздействующих факторов. На рис. 1.3 представлена классическая схема проведения испытаний на различных этапах жизненного цикла объектов РКТ, а также роль, место и функции научно-испытательного центра в этом процессе. Многие системы испытаний в различных отраслях, построенные по такой схеме, подтверждают свою высокую эффективность.

Важность испытаний на *этапе создания изделия РКТ* определяется тем, что именно на этом этапе закладываются необходимые уровни знаний и требуемых ресурсов (отрицательной энтропии), которые во многом определяют дальнейшую эволюцию систем производства и эксплуатации изделия. В системе *производства изделий РКТ* контрольно-технологические испытания призваны обеспечить поддержание заданного уровня знаний в условиях *изменения начальных условий*, связанного с неизбежной эволюцией технологий, материалов, науки и техники, социальной среды и т.д. На данном этапе *системы контроля качества должны заблаговременно диагностировать неизбежный переход системы производства в неустойчивое состояние.*

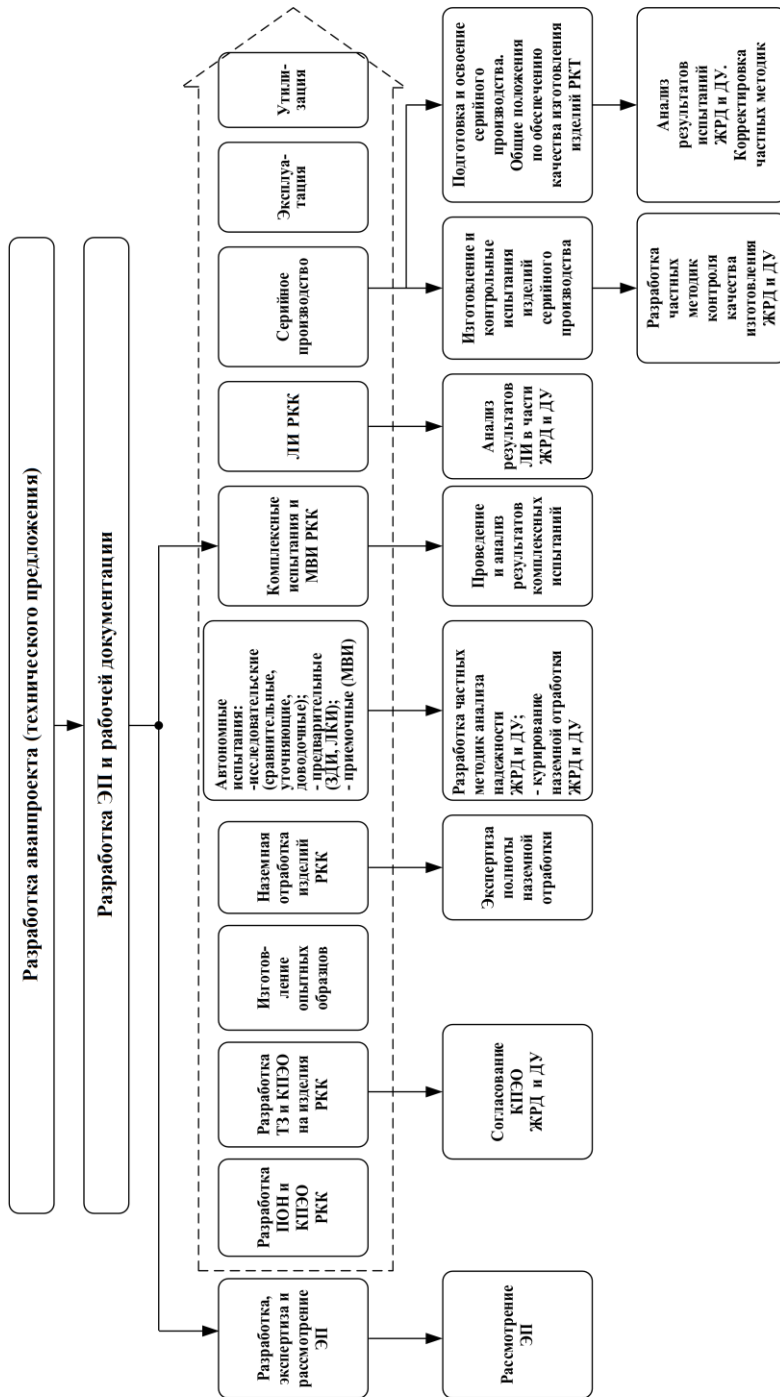


Рис. 1.3. Создание и серийное производство ракетно-космических комплексов (РКК) и входящих в них изделий:
 ЭП – эскизный проект; ПОН – программа обеспечения надежности; КПЭО – комплексная программа экспериментальной отработки; ЖРД – жидкостный ракетный двигатель; ДУ – двигательная установка; ТЗ – техническое задание; ЗДИ – за-
 вершающие доводочные испытания; ЛКИ – летно-конструкторские испытания; ЛИ – летные испытания; МВИ – межве-
 домственные испытания; ПКИ – предварительные конструкторские испытания

Но вместе с тем качественный прорыв, который произошел в области информатизации и компьютеризации в испытательной практике, еще не проявился, по крайней мере, в достаточной степени. Для создания эффективной в широком смысле системы экспериментальной отработки необходимо переосмыслить организационные, технические и экономические вопросы по широкому спектру проблем и найти их решение, основываясь на едином информационном и методологическом пространстве.

По нашему мнению, смысл понятия «испытания» может быть уточнен в терминологии информации и энтропии.

Как уже было отмечено, энтропия является фундаментальным свойством любых систем с неоднозначным или вероятностным поведением. Впервые понятие энтропии было определено Р. Клаузиусом и Л. Больцманом как мера необратимого рассеяния энергии для замкнутых термодинамических систем. В статистической физике энтропия является мерой вероятности реализации какого-либо макроскопического состояния. В теории информации энтропия H как мера неопределенности какого-либо сообщения, которое может иметь разные интерпретации (исходы), была введена К. Шенноном [4] из чисто практических соображений, вызванных необходимостью измерения количества передаваемых данных в условиях скачкообразного развития технических средств связи:

$$H = -\sum P_i \log_2 P_i,$$

где N – число возможных сообщений (исходов); P_i – вероятность получения i -го сообщения (исхода) из полного набора символов вырабатываемых источником сообщений.

Данное выражение, повторяющее по форме выражение энтропии Л. Больцмана, означает, что чем более ожидаемым, вероятным является событие, тем меньше информации мы получаем. То есть уменьшение неопределенности сведений (сообщений) может использоваться в качестве меры количественной (вероятностной) оценки информации. Под информацией I стали понимать не любые сообщения, передаваемые в системе связи (взаимодействия между системами и их элементами), а лишь те, которые уменьшают неопределенность у получателя информации об объекте. Чем больше уменьшается эта неопределенность, т.е. чем больше снижается энтропия сообщения, тем выше информативность поступившего сообщения:

$$I = H_0 - H_1.$$

Говоря простым языком, разница между энтропией и информацией заключается в следующем: энтропия – это мера множества тех состояний системы, о пребывании в которых система должна забыть, а информация – это мера множества тех состояний, о пребывании в которых система должна помнить.

Первоначально совпадение с точностью до коэффициента определений термодинамической и информационной энтропий выглядело формально, более того, послужило основанием считать, что энтропия есть недостающая информация о системе. Н. Винер, используя сходство формул, определил [5]:

$$I = -H,$$

Отрицательную энтропию вслед за Л. Бриллюэном стали называть «негэнтропией» [6]. В итоге оказалось, что ввиду невозможности выполнения данного выражения по определению, ибо $I > 0$ и $H > 0$, как следствие негэнтропийного принципа Л. Бриллюэна был сформулирован закон сохранения:

$$I + H = \text{const.}$$

В итоге понятие негэнтропии трансформировалось в понятие обобщенной негэнтропии как промежуточного звена между информацией и вещественно-энергетическим миром. В таком понимании информация рассматривается как процесс, взаимосвязь, отношение между явлениями системы. Информацию для получателя дают не всякие сведения (данные), а лишь те новые, которые до получения информации не были известны получателю, и поэтому они уменьшают неопределенность для получателя и, следовательно, увеличивают обобщенную негэнтропию по отношению к интересующему его целевому критерию для решения конкретных задач. Таким образом, информацией является только процесс (связь) между системами, в результате которого увеличивается обобщенная негэнтропия хотя бы для одной из систем из-за получения новых знаний, сведений, данных и снижается неопределенность системы получателя информации. Обобщенная негэнтропия определяется как разность максимально возможной $OЭ_{\max}$ и реальной $OЭ_p$ обобщенной энтропии, которые характеризуют соответственно максимально возможную и реальную (после получения информации) неопределенность системы. Для определения $OЭ_{\max}$ и $OЭ_p$ должны быть известны цель и назначение системы и условная вероятность их достижения.

Теме испытаний близки закономерности взаимосвязи информационного взаимодействия и управления. Если рассматривать взаимодействие сложной открытой системы и внешней среды с точки зрения теории управления, то исходя из принципа Эшби управление может быть обеспечено только в том случае, если разнообразие средств управляющей системы по крайней мере не меньше, чем разнообразие управляемой им ситуации: «Только разнообразие может уничтожить разнообразие» [7].

Воспользуемся интерпретацией принципа Эшби, предложенной в [8]. Естественным критерием эффективности управления является степень соответствия управляющих воздействий состояниям объекта управления. При реальном управлении имеет место отклонение состояния объекта управления от требуемого состояния, что обусловлено рядом причин.

Для формального представления принципа Эшби используются понятия безусловной и условной энтропии. Безусловная энтропия определяется как

вся потенциальная информация, т.е. мера априорной неопределенности. Условная энтропия – это остаточная информация после получения сообщения. Разность между условной и безусловной энтропиями составляет количество получаемой информации.

Смысл принципа необходимого разнообразия Эшби, определяющего предельные возможности управления при наличии информационного обмена между управляющей системой (УС) и объектом управления (ОУ), выражается соотношением

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

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

Из приведенной формулы следует, что повышение эффективности управления, т.е. уменьшение энтропии $H(X/Y)$, достигается за счет:

уменьшения $H(Y)_{\max}$, т.е. сокращения разнообразия возможных состояний объекта испытаний;

увеличения разнообразия управляющих воздействий $H(X)$;

уменьшения степени несоответствия получаемых УС сообщений о состоянии ОУ их реальным состояниям $H(Y/X)$.

Обратимся теперь к испытаниям сложных научно-технических изделий, целью которых является получение информации о свойствах объекта испытания. В терминах управления объект испытаний является объектом управления, управляющая система представляет собой испытательную станцию, а сами испытания – уменьшающий энтропию процесс получения знаний об объекте управления.

Уменьшение разнообразия состояний объекта испытания $H(Y)_{\max}$ достигается в ходе испытаний за счет снятия ряда известных неопределенностей.

Неопределенность конструкторских решений. Как известно, целью испытаний является подтверждение соответствия требованиям ТЗ заявленных характеристик изделия (например, тяги), начальных условий запуска (например, температур компонентов топлива на входе ЖРД после заправки), работоспособности составных элементов (например, ЖРД, пневмогидросистемы (ПГС), системы управления расходом топлива и т.п.) и всего изделия в целом в условиях, максимально приближенных к штатным (полетным).

Неопределенности конструкторских решений в немалой степени связаны с **неопределенностью использованных на этапе проектирования математических и расчетных моделей**. Известно, что полная модель сложной системы невозможна по определению, а частные модели ориентированы на частные свойства. Модели процессов, происходящих в объекте испытаний, могут лишь уточняться до разумно возможной степени неопределенности по результатам реальных испытаний. Например, только описание процессов в современных ЖРД типа РД-191, который установлен на универсальном ракетном модуле семейства ракет «Ангара» (УРМ-1), требует построения более 400 дифференциальных и алгебраических уравнений [9,10]. Для ракеты в целом модель еще более усложняется.

Поэтому достаточно прагматичным, по крайней мере на современном этапе, является подход, суть которого состоит в автоматизированном сравнении с помощью определенных диагностических признаков результатов расчета с использованием математических моделей, составленных на базе уравнений, описывающих основные процессы (в жидкостных и газовых трактах, турбонасосных агрегатах, перемещений органов управления, смешения и горения компонентов топлива в камере и газогенераторе) «идеального» (с использованием осредненных или проектных характеристик) и реального (с использованием результатов огневых испытаний) двигателя [11].

Как показывает практика испытаний, конструкторские просчеты могут иметь место просто в силу чрезвычайно высокой сложности изделий. Так, например, при испытаниях УРМ-2 (третья ступень РН «Ангара»), на этапе «холодных» испытаний, было выявлено, что обеспечить требуемые температурные параметры окислителя на входе в двигатель перед его запуском при данных характеристиках ПГС изделия невозможно. Для парирования этого обстоятельства была доработана схема захолаживания кислородной магистрали. Другой пример. Огневое испытание РН «Союз-2-1в» было остановлено системой аварийной защиты по снижению давления горючего перед форсунками камеры сгорания на 153-й секунде. Причина – засорение фильтра на входе в двигатель углеродными частицами, попадающими в горючее из-за наддува бака генераторным газом. В результате конструкторами изделия была изменена схема наддува бака.

Неопределенности логики и реализации бортового программно-алгоритмического обеспечения. Как известно, изделия РКТ (ракетная ступень, космический аппарат) кроме «железа» в своем составе имеют бортовые приборные средства измерения и управления. Информатизация и интеллектуализация РКТ с каждым годом растут. *Алгоритмическое обеспечение бортовых вычислительных машин*, реализация которого насчитывает тысячи и десятки тысяч строк программного кода, *также является объектом испытаний*. Нет необходимости говорить о сложности отладки программного обеспечения та-

ких объемов. Недаром одно из эквивалентных определений меры информации было сформулировано А.Н. Колмогоровым в терминах длины программы, реализующей необходимую задачу.

Неопределенности, связанные с технологией и качеством производства изделия. Вопросы технологии и управления качеством изготовления и сборки узлов, агрегатов и изделий РКТ, а также построения соответствующих математических моделей достаточно подробно рассмотрены в [12, 13]. В [14] также приведены теоретические основы применения к проблемам управления технологическими процессами энтропийного подхода. Общим для большинства моделей является представление критерия качества управления в виде функционала от разности между действительным и требуемым состоянием технологического процесса в n -мерном пространстве состояний системы x_1, \dots, x_n , причем начальные условия задают точку в этом пространстве. Так как все x – функции времени, то точка будет описывать некоторую траекторию. Считается, что процесс протекает удовлетворительно, если значения критерия качества не превышают определенной величины при $0 \leq t < \infty$ (или начиная с некоторого момента времени $t = T_n$) в условиях возмущающих воздействий.

Исходя из этого очевидно, что одной из целей испытаний на всех этапах жизненного цикла изделия является уточнение и контроль допустимых границ пространства начальных условий, обеспечивающих устойчивое производство и целевое использование изделия в условиях эволюционного развития науки, техники, материалов, технологий, социально-экономических отношений и т.п.

Неопределенность технологии эксплуатации изделия (подготовка и запуск изделия на космодроме, последующая эксплуатация на орбите) снимается в ходе стендовых испытаний. Поскольку определение параметров технологического процесса является одной из целей испытаний, для начального этапа стендовых испытаний характерен полуавтоматический режим работы с большой долей ручных операций. Как будет показано ниже, управление объектом испытания может быть описано с помощью модели параллельно функционирующих автоматов, соответствующих параллельным процессам сетевого графика работ (заправка баков, термостатирование, стоянка и т.п.). Каждый автомат описывается конечным множеством состояний и переходов из одного состояния в другое, причем состояния фиксируют результат предшествующих событий, а переходы – дальнейшие действия, обусловленные логическими и функциональными зависимостями на множестве параметров стенда и изделия. К окончанию стендовых испытаний формируются исходные данные для разработки штатной технологии автоматической подготовки изделия, его пуска и последующей эксплуатации.

Увеличение разнообразия управляющих воздействий $H(X)$. Сразу отметим, что речь идет не об увеличении энтропии управляющей системы, в

нашем случае – испытательного стендового комплекса. Разнообразие управляющих воздействий представляет собой не что иное, как поток отрицательной энтропии в виде научно-технических, материальных, социально-экономических ресурсов, направленных на обеспечение испытания изделия.

В этом смысле *разнообразие управляющих воздействий должно соответствовать, а в идеале существенно превосходить разнообразие состояний объектов управления*, в том числе для вывода объекта испытаний из экстремальных ситуаций без разрушения материальной части, что очень важно для испытаний РКТ.

Уменьшение степени несоответствия получаемых сообщений реальному состоянию объекта управления $H(Y/X)$. В общем смысле речь идет о беспомеховой передаче сообщений от объекта управления (изделия) к управляющей системе (испытательному стенду). Несоответствие между предполагаемым и реальным состояниями объекта управления будет автоматически приводить к выработке неадекватных управляющих воздействий. В испытательной практике это положение показывает роль подготовки и аттестации стендовых пневмогидросистем, систем автоматизации испытаний (измерения, управления, регулирования), аварийной защиты, контроля и диагностики, систем автоматизированного анализа результатов испытаний.

В связи с развитием информационных технологий все большую роль для снижения данного рода энтропии играют инструменты структурирования, организации хранения и доступа к информации (базы данных, базы знаний и т.п.).

Изложенное позволяет сделать следующие **заключения**:

1. Схема взаимодействия испытательной системы и объекта испытаний носит итерационный характер. Процесс испытания разворачивается во времени. Испытания сложного изделия начинаются с его элементов, агрегатов и заканчиваются комплексными испытаниями всего изделия, сначала «холодными», потом огневыми. На каждом этапе происходит уточнение всех элементов приведенной выше формулы.

Попытки обойти некоторые этапы создания сложного изделия, например производить бросковые летные испытания ступеней РН, минуя их стендовую отработку, как правило, не приводят к успеху. Как показывает опыт создания ракеты-носителя Н1 и межконтинентальной баллистической ракеты (МБР) «Булава», при таком подходе не наблюдается сокращения ни времени, ни стоимости проекта. В основе причин подобного рода неудач лежит непонимание фундаментальных законов поведения сложных систем, из которых следует, что *свойства сложной системы не выводимы из свойств частей*. То есть имеющийся задел конструкторских решений, отработанных элементов и агрегатов при воплощении в новое изделие даст с большой степенью вероятности новые, не предсказанные расчетами свойства.

2. Приведенные в начале главы рассуждения приводят нас к обобщенной схеме взаимодействия систем заказчика (потребителя), разработчика (изготовителя) и системы испытаний, определяющей соответствие разработанной (изготовленной) продукции требованиям заказчика (потребителя) (рис.1.4).

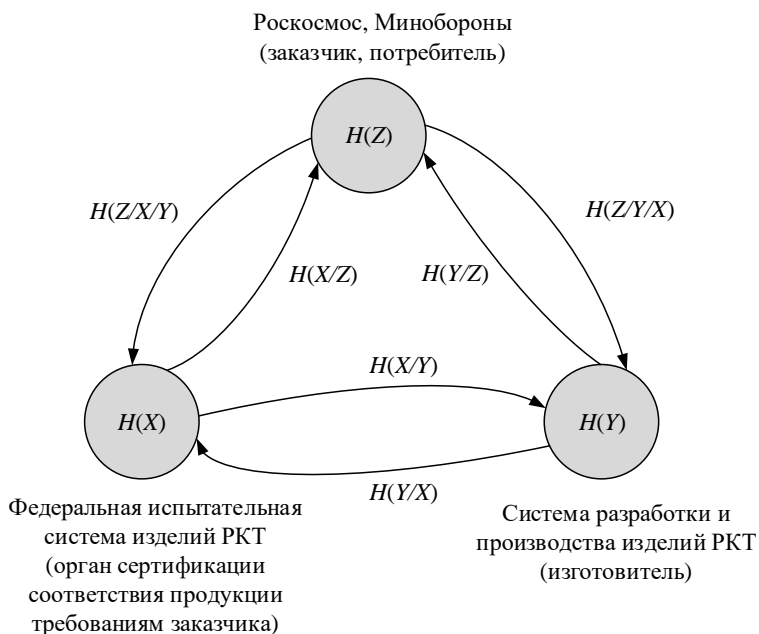


Рис. 1.4. Обобщенная схема взаимодействия систем заказчика (потребителя), разработчика (изготовителя) и федеральной системы испытаний

Наличие обратных связей от разработчика $H(Y/Z)$ и испытательной системы $H(X/Z)$ способствует более эффективному управлению $H(Z/Y/X)$ и $H(Z/X/Y)$ со стороны заказчика (известно, что $H(Z/Y/X) < H(Z/Y)$ и $H(Z/X/Y) < H(Z/X)$) и использованию его ресурсов – отрицательной энтропии $H(Z)$. Отсюда следует обоснованность утверждения авторов о необходимости наличия независимой от разработчика (изготовителя) системы испытаний, подтверждающей соответствие продукции требованиям заказчика и накапливающей объективную информацию для анализа качества в ходе жизненного цикла изделия. В случае когда испытания осуществляются «внутри» системы разработки и производства (рис. 1.5), информация о нюансах управления испытанием $H(X/Y)$ и особенностях самого изделия $H(Y/X)$ для заказчика просто «теряется», а отрицательная энтропия $H(X)$, связанная с поддержкой экспериментальной базы, становится внутренней, изымающей ресурсы у самой системы разработки и производства изделий.

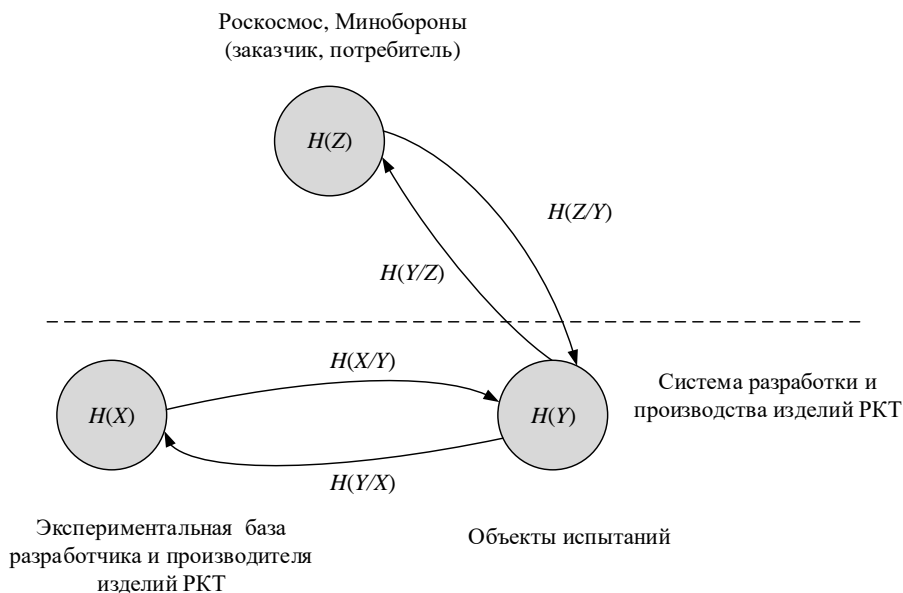


Рис. 1.5. Обобщенная схема взаимодействия систем заказчика (потребителя) и разработчика (изготовителя) с собственной экспериментальной базой

Если быть до конца объективными, то задача распределения полномочий между федеральными испытательными центрами и экспериментальными базами разработчиков и изготовителей изделий РКТ далеко не однозначна.

Если отдать приоритет экспериментальным базам разработчиков, то ресурсы заказчика, предназначенные для развития и поддержки национальной испытательной системы, «размажутся» по изготовителям техники, которые будут дублировать друг друга.

Отдать все испытания федеральным центрам нерационально. Серийные изделия проходят испытания на экспериментальных базах заводов-изготовителей, и это нормально, если число испытаний составляет несколько десятков в год. То же самое можно сказать относительно испытаний новых изделий и их агрегатов, ибо на этапе разработки и доводки изделия наиболее важна оперативность принятия технических и конструкторских решений и их экспериментальной проверки (кстати, на данном этапе заказчика, как правило, интересуют вопросы финансирования и планирования работ, а также текущего состояния разрабатываемого изделия). Другое дело – дорогостоящие испытания единичных изделий типа ступеней РН, ДУ, ЖРД с имитацией высотных условий или государственные, межведомственные приемочные и специальные периодические испытания и т.п. Такие испытания должны проводиться в федеральных испытательных центрах.

Выводы:

- Как сложная диссипативная динамическая система, система создания изделий РКТ имеет ограниченный период существования, определяемый фундаментальными законами природы.
- Для длительного периода стабильного существования система должна формироваться при относительно неизменных входных условиях и в последующем поддерживаться гарантированным уровнем ресурсов (отрицательной энтропией).
- Жизненный цикл изделия неизбежно ограничен конечным временем существования производящей его системы. Подобно другим областям науки и техники производство и сами изделия РКТ должны периодически обновляться и быть подчинены государственным целям (оборонным, научным, экономическим, социальным, технологическим и т.п.), быть интересными в познавательном плане для ученых, инженеров и всего общества.
- Испытания изделий РКТ являются неотъемлемой частью процесса создания и эксплуатации сложных изделий на протяжении всего их жизненного цикла, *обеспечивающей контроль качества, устойчивое производство и эффективное использование* изделия в условиях эволюционного развития науки, техники, материалов, технологий, социально-экономических отношений и т.п.
- Разнообразие инструментария испытательных стендов напрямую связано с основной задачей испытаний – получением знаний об объектах испытаний, о соответствии их характеристик предъявляемым требованиям.
- Эффективность испытаний и последующей эксплуатации изделий РКТ определяется уровнем развития информационного обеспечения сопровождения их жизненного цикла, а именно инструментами обработки, анализа, структурирования, организации хранения и доступа к информации (базы данных, базы знаний и т.п.), а также *формирования выводов и прогнозов по их использованию или совершенствованию*.

1.3. Особенности изделий РКТ как объектов испытаний

Изделия РКТ представляют собой широкую номенклатуру разнородных технических объектов с весьма специфичными свойствами, которые характеризуются, в частности, следующими отличительными особенностями:

большинство изделий РКТ является изделиями однократного применения, их повторное использование зачастую исключается;

значительная часть изделий РКТ предназначена для использования в условиях космического пространства, поэтому их экспериментальная отработка в земных условиях весьма ресурсоемка и проблематична;

в процессе эксплуатации большинства объектов РКТ существенно затруднен информационный обмен с изделиями и практически невозможен их ремонт или настройка. Очень многие изделия в процессе эксплуатации никогда не возвращаются на Землю;

изделия РКТ, как правило, представляют собой объекты исключительной конструктивной сложности, техническое состояние которых может быть описано при использовании большого числа (до 2000 и более) разнородных физических параметров;

изделия РКТ, как правило, являются крайне дорогостоящими продуктами (например, стоимость одного запуска РН «Дельта IV» оценивается приблизительно в 140...150 млн дол. США);

значительная часть изделий РКТ (например, ступени РН и ЖРД) представляет собой высокоэнергетические объекты, характеризующиеся крайне напряженными режимами работы (давление в камере сгорания современных ЖРД составляет 10...20 МПа при температуре продуктов сгорания 3000...3700 К), что делает их потенциально опасными объектами. Трогильный эквивалент взрыва при аварии ракетной ступени может составлять до нескольких десятков тонн;

зачастую изделия РКТ используют токсичные компоненты или имеют токсичные выбросы продуктов сгорания;

процессы, протекающие при работе изделий РКТ, зачастую имеют настолько малые постоянные времени, что не могут физически контролироваться и управляться человеком и требуют специальных быстродействующих автоматизированных систем контроля и управления.

Рассмотренная выше специфика изделий РКТ обуславливает принципиальное отличие их экспериментальной отработки по сравнению с испытательной практикой, характерной для других отраслей промышленности, предопределяет крайне бережное и деликатное обращение с объектами испытаний и требует использования специальных подходов к планированию экспериментальной отработки и проведению испытаний.

Очевидно, что широко распространенная в промышленности практика проведения испытаний в процессе опытной эксплуатации для большинства изделий РКТ практически неприменима, поскольку, как правило, невозможны устранение выявленных в ходе опытной эксплуатации недостатков и доработка конструкции. Исключение составляют только наземные элементы космических ракетных комплексов, которые в этом аспекте сходны с общепромышленным оборудованием.

Вернемся к особенностям испытаний в системе создания и производства ракетно-космических комплексов (РКК) и входящих в них изделий (см. рис 1.3).

Летные испытания. Летные конструкторские испытания (ЛКИ), являющиеся основой экспериментальной отработки в авиационной промышленности, для изделий РКТ принципиально не могут обеспечить подтверждения

значительной части предъявляемых к ним требований. Казалось бы, что ввиду практической сложности воспроизведения штатных условий эксплуатации при наземных испытаниях роль летных испытаний для изделий РКТ должна быть исключительно высокой, однако на практике ЛКИ для изделий РКТ оказываются не всегда исчерпывающими.

Во-первых, при проведении эксперимента мы получаем единичную реализацию случайной величины. Для оценки интервала ожидаемых действительных значений необходима статистика единичных реализаций, причем от числа реализаций существенно зависит надежность полученной оценки. Обращаясь к примеру авиации, мы видим, что при проведении ЛКИ различные режимы полета самолета воспроизводят многократно, обеспечивая необходимую статистику. Для изделий РКТ, например ракеты-носителя, в настоящее время редко выполняется более 5 испытаний. Чаще всего этап ЛКИ включает от 1 до 3 испытаний РН. Понятно, что при таком числе испытаний надежных оценок интервала ожидаемых действительных значений для параметров РН получить невозможно.

Во-вторых, при летных испытаниях самолетов намеренно воспроизводятся предельные и даже запредельные режимы полета (например, режимы флаттера), обеспечивающие оценку их работоспособности в пределах условий, оговоренных в ТЗ. При ЛКИ изделий РКТ, как правило, воспроизводится один или несколько (если это предусмотрено для данного изделия) номинальных режимов работы. Следствием этого является практическая невозможность оценки работоспособности изделий РКТ на границах диапазона внешних условий по результатам ЛКИ или штатной эксплуатации. Если границы допустимого для изделия диапазона внешних условий не проверены другими способами, последствия могут быть катастрофическими. Достаточно вспомнить гибель многоразового космического корабля (МКК) «Челленджер», произошедшую после многолетней эксплуатации из-за пониженной в период запуска температуры окружающей среды.

Причинами ограниченной эффективности ЛКИ при испытаниях большинства изделий РКТ являются однократность их использования и высокая стоимость отработки.

Кроме перечисленного существенным недостатком ЛКИ изделий РКТ является ограниченный объем регистрируемой информации. Основной причиной ограничения объема информации при ЛКИ в настоящее время является не ограничение пропускной способности каналов передачи телеметрической информации, а принципиальная невозможность размещения дополнительных датчиков на летном изделии, поскольку их установка существенно ухудшает энергетические характеристики и надежность.

Так называемые бросковые испытания являются по сути ЛКИ, при которых штатное изделие заменяется его упрощенным аналогом. Являясь, по

сути, летными испытаниями, бросковые испытания обладают всеми недостатками, присущими ЛКИ. Кроме того, у бросковых испытаний имеются собственные недостатки, связанные с неполным воспроизведением штатных полетных условий. Использование бросковых испытаний обычно связано с недостатком времени или средств для организации полноценной наземной отработки.

Завершая рассмотрение роли ЛКИ в экспериментальной отработке изделий РКТ, можно констатировать, что летные испытания являются необходимым элементом экспериментальной отработки, но явно недостаточным для подтверждения соответствия изделия требованиям технического задания. Для изделий РКТ необходим существенно расширенный этап наземной стендовой отработки, включающий *автономные и комплексные испытания*, а также широкое использование математического и физического моделирования.

Наземные комплексные испытания (НКИ), как правило, являются завершающим этапом наземной отработки изделий РКТ. Рассмотрим их основные достоинства и недостатки на примере комплексных испытаний ступеней РН.

Комплексные испытания ступеней РН обычно включают в себя «холодные» стендовые испытания (ХСИ) и огневые стендовые испытания (ОСИ). При ХСИ отрабатываются режимы работы изделия, соответствующие его штатной работе на стартовом комплексе при подготовке к полету. Отрабатываются режимы термостатирования, заправки изделия компонентами ракетного топлива, стоянки заправленного изделия в режиме ожидания старта, слива компонентов при отмене запуска и т.д. Кроме того, при ХСИ отрабатывается работа системы подачи компонентов топлива в режиме имитации штатного потребления их двигателями. ОСИ, как правило, являются финалом наземной стендовой отработки и представляют собой наземную работу двигательной установки в режиме, максимально приближенном к штатному режиму работы в полете.

Основным достоинством ХСИ и ОСИ по сравнению с ЛКИ является их существенно более высокая информационная отдача. Количество информации, получаемой при ХСИ и ОСИ, как правило, в 2–3 раза превышает количество информации, получаемой при ЛКИ. За счет чего?

Во-первых, для стендовых испытаний используются так называемые стендовые варианты изделий РКТ, отличительной особенностью которых является возможность организации измерений существенно большего числа параметров работы изделия. Это достигается как за счет установки в изделие дополнительных датчиков, показания которых регистрируются стендовой системой измерения, так и измерениями параметров изделия измерительными средствами, размещенными на стенде.

Во-вторых, информационная отдача наземных испытаний значительно повышается за счет исследования технического состояния изделия после завер-

шения испытания. Более того, в случае использования развитых средств контроля и аварийной защиты при наземных испытаниях реализуется возможность прекращения работы изделия на начальных стадиях развития аварийной ситуации. В результате последующего исследования технического состояния изделия повышается вероятность выявления причины неисправности. Примером, иллюстрирующим последнее заключение, может являться досрочное прекращения ОСИ первой ступени РН «Союз-2-1в» из-за падения давления горючего на входе в насос рулевого двигателя. В случае возникновения подобного дефекта при ЛКИ досрочное выключение двигательной установки привело бы к неудаче всей миссии, а разрушение ступени при падении на землю заметно затруднило бы обнаружение источника дефекта. Напротив, контроль технического состояния изделия после ОСИ позволил однозначно установить, что причиной возникновения аварийной ситуации является засорение входного фильтра двигателя частицами сажи, попадающими в бак РН при работе системы «горячего» наддува. Оперативно выполненная доработка системы наддува обеспечила своевременное парирование дефекта и успех последующих ЛКИ.

В-третьих, при проведении ХСИ и ОСИ реализуется возможность компенсации недостаточной эффективности работы бортовых систем за счет использования стендового оборудования. Наиболее характерный пример компенсации недостатков бортовых систем при ОСИ – применение стендового наддува баков изделия при недостаточной эффективности бортового наддува. Понятно, что в случае реализации такого дефекта на этапе ЛКИ произойдет аварийный останов двигателя из-за срыва насосов системы подачи топлива. Досрочное и аварийное выключение в этом случае не позволит получить информацию о работе остальных систем ступени, в особенности на завершающих режимах работы. Единственным информационным итогом такого ЛКИ станет выявление дефекта системы наддува баков. Компенсация недостатка наддува за счет стендовой системы обеспечивает продолжение испытания и получение информации о работе остальных систем ступени РН.

Главным достоинством комплексных испытаний изделий РКТ по сравнению с другими видами наземной экспериментальной отработки является проверка взаимодействия и взаимного влияния максимального числа систем и агрегатов изделия. Эффекты взаимодействия и взаимного влияния агрегатов и систем являются наиболее сложными аспектами для аналитической оценки и математического моделирования. Кроме того, границы систем, выпускаемых различными разработчиками, как правило, являются концентраторами ошибок, связанных с воздействием человеческого фактора. С учетом изложенного выше исключительная ценность НКИ в общем объеме наземной экспериментальной отработки является неоспоримой.

Отмечая исключительную ценность НКИ изделий РКТ, нельзя оставить без внимания их недостатки.

НКИ являются крайне дорогостоящими и продолжительными. На основе опыта проведения ХСИ и ОСИ ступеней РН «Ангара», «Союз-2» и «Союз-2-1в» можно констатировать, что темп проведения испытаний не превышает 2–3 испытания в год. Из-за указанных обстоятельств в современной практике отработки РН используется от 2 до 5 ХСИ и от 1 до 3 ОСИ ступеней. При таком объеме комплексные наземные испытания обладают теми же недостатками, что и ЛКИ.

Из-за крайне малого числа реализаций результаты НКИ не образуют достаточной статистической базы для надежной оценки действительных характеристик изделий.

Из-за ограниченного числа испытаний и их высокой стоимости, а также вследствие крайней потенциальной опасности объекта испытаний и высокого материального ущерба при возможном аварийном исходе НКИ, как правило, проводятся при номинальных режимах работы изделий РКТ и номинальных сочетаниях внешних факторов. Предельные и потенциально опасные режимы работы изделия при НКИ не воспроизводятся.

Имеют место также некоторые ограничения по измеряемым параметрам, обусловленные главным образом сложностью организации измерений в условиях плотной компоновки собранного изделия РКТ, а также потенциальной угрозой безопасности проведения испытаний при установке датчиков измерения отдельных параметров (например, для непосредственного измерения давления в камере сгорания ЖРД).

Кроме того, НКИ несут в себе недостатки, в большей или меньшей мере присущие всем наземным испытаниям изделий РКТ: во-первых, отличие конструкции штатного и подвергающегося испытанию стендового изделия; во-вторых, неполное воспроизведение при испытаниях штатных условий эксплуатации.

На примере ОСИ ступеней РН рассмотрим основные отличия в конструкции стендового и штатного изделий, и причины, их обуславливающие.

Наиболее серьезные изменения в конструкцию изделий при их подготовке к ОСИ вносятся для уменьшения вероятности возникновения аварии и уменьшения масштаба вероятных разрушений при ее возникновении. Наиболее часто используются:

дополнительная защита для предотвращения повреждения баков изделия при аварии в двигательном отсеке. Используется либо броневая защита для предотвращения повреждения баков осколками в случае взрыва двигателя, либо тепловая защита для сохранения баков при пожаре в двигательном отсеке;

дополнительные магистрали для ускоренного слива компонентов топлива из баков изделия при аварийных ситуациях;

дополнительные коллекторы или патрубки для реализации возможности дополнительного наддува и дренажа баков с использованием стендовых систем;

дополнительные коллекторы для подачи инертных газов, чаще всего азота, в сухие отсеки изделия в аварийных ситуациях.

Установка дополнительных датчиков помимо повышения безопасности испытаний преследует цель существенного увеличения информационной отдачи НКИ, обеспечивая реализацию их основных преимуществ. Однако установка дополнительных средств измерений также неизбежно приводит к отличию конструкции стендового изделия от штатного.

Неполное воспроизведение штатных условий эксплуатации при ОСИ также часто вызывает необходимость существенной доработки конструкции для стендового изделия, в особенности при испытаниях верхних ступеней ракет-носителей и разгонных блоков.

Это связано с тем, что воспроизведение некоторых полетных условий, например невесомости, при проведении НКИ практически невозможно, а воспроизведение других, например пониженного давления окружающей среды, является настолько сложной технической задачей, что стоимость ее реализации оказывается неприемлемо высокой. Кроме того, использование сложной технической системы имитации штатных условий эксплуатации многократно повышает риск аварийного исхода испытаний. Указанные обстоятельства приводят к тому, что имитация штатных условий эксплуатации при ОСИ ступеней РН, как правило, выполняется в минимальном объеме. При проведении ОСИ верхних ступеней РН и космических разгонных блоков в атмосферных условиях возникает необходимость доработки их двигателей для предотвращения негативных последствий отрыва потока в соплах. Также приходится дорабатывать дренажные магистрали изделий для подключения их к стендовым системам утилизации выбросов.

Переходя к рассмотрению основных проблем, возникающих при проведении НКИ, можно отметить следующее. Главной проблемой является обеспечение безопасности проведения испытания, поскольку, как это уже отмечалось выше, авария при проведении НКИ может не только сопровождаться разрушением испытываемого изделия и стендового оборудования, но и наносить ущерб окружающей территории в виде разрушений, вызванных ударной волной, или воздействием на экологию массированных выбросов токсичных веществ. Серьезной проблемой также являются уникальность и высокая стоимость объекта испытаний и стендового оборудования. Из-за этого ошибки на любом этапе подготовки или проведения испытаний, вызывающие потерю работоспособности изделия, могут сопровождаться значительными материальными потерями.

Главная сложность проведения НКИ связана с большим числом различных подсистем, образующих объект испытания. Требования, предъявляемые к стендовому оборудованию со стороны каждой из подсистем изделия, как правило, тривиальны и не требуют разрешения сложных научно-технических проблем. В то же время выполнение всех требований в совокупности является сложнейшей технической и организационной задачей. Необходимо отметить, что при НКИ взаимодействие большинства подсистем изделия реализуется

впервые. Поэтому при подготовке НКИ решается задача разработки технологии и проведения проверки соответствия требованиям ТЗ всех подсистем изделия и стенда, а также проверки интерфейсов (связей) подсистем. Решающее значение имеет качество разрабатываемой технологической и организационной документации, а также производственная дисциплина, обеспечивающая неукоснительное следование документации. В процессе работы над документацией центральное место занимает ее согласование технологами испытательной организации с разработчиками как самого изделия в целом, так и его отдельных подсистем. Особые проблемы возникают при проверках бортовых и стендовых систем управления и аварийной защиты. Из-за использования в современных системах сложных и существенно разветвленных алгоритмов формирования решений проверка соответствия их требованиям документации выливается в сложнейшую задачу, для решения которой зачастую требуется разработка специализированных программных и аппаратных средств контроля.

Необходимо обратить внимание, что *НКИ всегда являются приемочными и имеют крайне высокий статус межведомственных или государственных испытаний*. В этой связи все используемое для проведения НКИ оборудование должно быть предварительно аттестовано.

Завершая рассмотрение роли НКИ в отработке изделий РКТ, необходимо констатировать, что НКИ являются важнейшим элементом, завершающим наземную экспериментальную отработку, отказ от использования которого чреват передачей в эксплуатацию изделий, имеющих скрытые конструктивные или технологические недостатки. В то же время следует подчеркнуть, что массив информации, полученный в результате проведения НКИ, не может образовать статистическую базу, достаточную для подтверждения соответствия характеристик изделия РКТ требованиям ТЗ. Другими словами, подтвердить соответствие характеристик изделия РКТ требованиям ТЗ только на основании результатов НКИ (или НКИ и ЛКИ совместно) нельзя. Для выполнения такой оценки необходимо привлечение результатов *автономных испытаний агрегатов и систем*, входящих в состав изделия РКТ, а также результатов *математического моделирования*.

Необходимость математического моделирования является принципиальной особенностью экспериментальной отработки изделий РКТ, непосредственно связанной с оценкой соответствия характеристик изделия требованиям ТЗ. Напомним, что штатные условия эксплуатации изделий РКТ воспроизводятся в полной мере только при ЛКИ. Кроме того, только при ЛКИ используется штатная конструкция изделия. Все остальные виды испытаний проводятся с использованием изделий, конструктивно отличающихся от штатного изделия, в условиях, в разной степени отличающихся от штатных

условий. Следовательно, для использования их результатов в оценке характеристик изделия необходимо введение *расчетных поправок* на особенности конструкции и различие условий испытаний и эксплуатации.

Автономные испытания агрегатов и систем изделий РКТ. Как было показано выше, характерной особенностью экспериментальной отработки изделий РКТ является обязательное использование результатов автономных испытаний составляющих их агрегатов и систем для подтверждения соответствия требованиям ТЗ действительных характеристик изделия в целом. Именно результаты автономных испытаний агрегатов и систем образуют необходимый массив данных, обладающий достаточной статистикой для оценки действительных значений характеристик с заданной доверительной вероятностью.

Рассмотрим особенности автономных испытаний агрегатов и систем изделий РКТ на примере испытаний ЖРД как наиболее сложного агрегата, входящего в состав ступени РН.

Во-первых, стоимость проведения единичного огневого испытания ЖРД приблизительно в 5–20 раз ниже стоимости ОСИ ступени РН в сборе, что обусловлено существенно меньшим объемом работ по проверке характеристик и взаимовлияния систем объекта испытаний на этапах контроля его технического состояния. При автономных испытаниях ЖРД число проверяемых элементов в 4–10 раз меньше. С учетом необходимости проверки взаимовлияния элементов сокращение общего числа контролируемых элементов существенно снижает трудоемкость проверок. Кроме того, достаточно большое число испытаний позволяет разделить на несколько долей (по числу испытаний) стоимость разработки технологии (технологической документации) проведения испытаний и стоимость аттестации стендового оборудования.

Во-вторых, безопасность проведения автономных испытаний ЖРД существенно выше безопасности проведения ОСИ ступени. Помимо уменьшения числа элементов объекта испытаний, приводящего к снижению вероятности отказа, ключевую роль в повышении безопасности играет существенное уменьшение ущерба при аварийных исходах испытаний ЖРД. Дело в том, что при автономных испытаниях ЖРД запасы компонентов топлива размещаются в стендовых емкостях, которые при проектировании стендов специально защищаются от последствий аварии испытываемого ЖРД. Количество компонентов, находящихся непосредственно в двигателе и подводящих трубопроводах, обычно в несколько десятков или сотен раз меньше полного запаса топлива. Соответственно, запас веществ, которые могут быть задействованы в развитии взрыва или пожара при аварии на испытаниях ЖРД, незначителен. Существенное повышение безопасности при испытаниях ЖРД по сравнению с ОСИ ступеней обеспечивается также за счет использования более чувствительных и быстро реагирующих систем аварийной защиты. Воз-

возможность использования при испытаниях ЖРД более чувствительных к отклонениям от заданного номинала систем аварийной защиты объясняется незначительным ущербом от прекращения единичного испытания в результате ложного выявления аварийной ситуации.

В-третьих, именно при автономных испытаниях ЖРД реализуется возможность измерения параметров, образующих основные целевые характеристики ступени РН в целом, с достаточной для подтверждения требований ТЗ точностью. Главные из этих параметров – тяга и расход компонентов топлива. Ввиду значительной технической сложности прямое измерение тяги при испытаниях ступеней РН не проводится. Кроме того, при испытаниях ступеней РН имеются проблемы измерения с достаточной точностью расхода компонентов топлива.

В-четвертых, при автономных испытаниях ЖРД возможна реализация большинства режимов работы, оговоренных в ТЗ, а также различных сочетаний внешних факторов в диапазоне, указанном в ТЗ, а в отдельных случаях и в расширенном диапазоне.

Наряду с этим автономные испытания ЖРД имеют следующие существенные ограничения.

Во-первых, условия штатного взаимодействия ЖРД с остальными элементами ступени РН воспроизводятся не в полной мере, поскольку при этих испытаниях остальные элементы РН воспроизводятся средствами стенда с большей или меньшей степенью подобия.

Для сравнения, огневые испытания ЖРД в составе ступени РН при НКИ позволяют осуществить:

- комплексную проверку технического состояния и подтверждение достигнутых при отработке значений основных параметров;
- проверку технологии процесса заправки;
- оценку правильности расчета гидравлических характеристик, а также величин гидроударов, пульсаций и «провалов» давления в магистралях ЖРД;
- подтверждение достаточности имитации эксплуатационных условий работы;
- оценку взаимного влияния двигателей (если их несколько) при их работе;
- оценку тепловых потоков и температурных режимов при работе ЖРД;
- проверку технического состояния системы наддува баков изделия;
- проверку функционирования рулевых машин и системы качания двигателей;
- проверку функционирования систем опорожнения баков и управления расходом топлива.

Во-вторых, даже для автономных испытаний ЖРД не всегда удается в достаточной степени воспроизвести штатные условия эксплуатации, в особенности связанные с пребыванием в космосе. Воспроизведение высотных условий, как правило, требует создания уникальных, чрезвычайно сложных технически и дорогостоящих стендовых сооружений, особенно для двигателей большой тяги. Например, стоимость создания стенда А-3 в Центре Стенниса

США для испытаний с имитацией высотных условий двигателя J-2X с тягой 100 тс оценивается в 342 млн дол. США.

В-третьих, материальный ущерб, который может сопровождать аварийный исход испытания, достаточно высок, что не позволяет на этом этапе проводить испытания с проверкой предельных режимов работы или воспроизведением аварийных ситуаций.

Представленные преимущества позволяют использовать автономные испытания ЖРД в качестве основного источника для образования массива данных, обеспечивающих оценку характеристик ступени РН в целом. Число выполняемых испытаний при этом, как правило, должно быть достаточно велико. В качестве современного примера можно привести испытания ЖРД Vinci, разрабатываемого компанией Snecma для Европейского космического агентства. В 2013–2014 гг. было выполнено 16 испытаний общей продолжительностью 5987 с (6-кратный полетный ресурс). Кроме того, в 2016 г. запланировано проведение еще двух серий испытаний для квалификации двигателя в 2017 г.

В то же время, приведенные недостатки не позволяют при оценке характеристик изделий РКТ ограничиться только привлечением результатов автономных испытаний крупных элементов или систем РН, таких как ЖРД, а требуют использования результатов автономных испытаний входящих в состав этих систем агрегатов. Например, проверка антикавитационных свойств насосов ЖРД и минимально допустимых давлений в баках РН на практике выполняется при автономной отработке насосов, проверка предельного уровня частоты вращения турбинонасосного агрегата (ТНА) и определение разрушающих чисел оборотов для подшипников и дисков турбин – вообще на специальных экспериментальных установках.

Рассматривая особенности автономных испытаний отдельных агрегатов, входящих в системы, можно отметить следующие их достоинства:

существенно более низкие материальные потери при аварийном исходе испытаний (по сравнению с испытаниями системы или элемента в целом), что позволяет воспроизводить предельные и аварийные режимы работы системы, в том числе и предельную продолжительность работы;

возможность измерения более полного набора параметров данного агрегата; как правило, более низкую стоимость единичного испытания, позволяющую обеспечить возможность набора большей статистики.

Автономные испытания агрегатов с точки зрения использования для подтверждения характеристик изделия в целом имеют следующие главные недостатки:

условия штатного взаимодействия агрегата с остальными элементами системы воспроизводятся не в полной мере, поскольку при этих испытаниях остальные элементы воспроизводятся средствами стенда с большей или меньшей степенью подобия;

для автономных испытаний агрегата не всегда удастся в достаточной степени воспроизвести штатные условия эксплуатации, в особенности связанные с пребыванием в космосе.

Необходимо обратить внимание, что в отличие от ЛКИ и НКИ автономные испытания элементов РН и систем, и тем более автономные испытания агрегатов, входящих в эти системы, не всегда являются приемочными и имеют статус межведомственных или государственных. Значительную часть объема автономных испытаний обычно составляют конструкторские доводочные испытания (ДИ). Отличительной особенностью этапа доводочных испытаний является возможное изменение конструкции объекта испытаний, поскольку совершенствование конструкции – одна из основных целей ДИ. В то же время для сокращения общего количества испытаний и стоимости отработки изделий в целом в настоящее время широко используется включение в массив данных, используемых для оценки соответствия характеристик изделия требованиям ТЗ, результатов автономной отработки его систем и элементов, полученных на этапе ДИ. Оценка допустимости использования результатов ДИ в этом случае является одной из важнейших задач при обработке результатов испытаний и оценке характеристик изделия.

Завершая рассмотрение автономных испытаний, следует отметить, что испытательное оборудование для автономной отработки агрегатов не всегда оказывается технически простым и дешевым по сравнению с аналогичным оборудованием для испытаний систем и элементов РН в целом. Для части агрегатов изделий РКТ, например агрегатов ЖРД больших тяг, организация автономных испытаний оказывается чрезвычайно сложной технической задачей и требует больших материальных затрат. В качестве примера оценим сложность автономных испытаний для камеры сгорания двигателя тягой 200 тс на кислородно-водородном топливе (размерность, соответствующая двигателю SSME многоразового транспортного космического корабля (МТКК) «Спейс шаттл»). Давление в камере сгорания составляет 18,9 МПа, расход окислителя ≈ 420 кг/с, расход горючего ≈ 70 кг/с. Если двигатель выполнен по схеме с дожиганием восстановительного генераторного газа, как SSME, то для его выработки потребуется установленный на стенде генератор. Давление подачи компонентов в этом случае должно быть повышено до давления в камере газогенератора, что составляет $\approx 45 \dots 50$ МПа. Штатная продолжительность работы SSME 500 с. Для организации вытеснительной подачи кислорода потребуются криогенные емкости общим объемом ≈ 170 м³ с рабочим давлением 50 МПа. Очевидно, что создание стенда для выбранной в качестве примера камеры сгорания становится технически крайне сложный и настолько дорогостоящим, что его осуществление практически невозможно.

Также практически не реализуемыми, как правило, являются автономные испытания криогенных баков большой емкости, испытания донной защиты и

элементов конструкции первых ступеней на воздействие акустики и отраженной газовой струи при старте РН, автономные испытания элементов стартового комплекса, подверженных воздействию струи продуктов сгорания и т.д. Исключительная сложность и высокая стоимость стендового оборудования для таких испытаний приводят к отказу от их проведения и переносу части задач на модельные испытания.

Модельные испытания. При проведении модельных испытаний в качестве объекта испытания выступают не сами изделия РКТ или их реальные составные части, а модели, подобные изделиям или элементам изделий в изучаемом аспекте. Условно можно выделить геометрически подобные масштабные модели, обычно повторяющие геометрию штатного изделия в уменьшенном масштабе, и экспериментальные установки, как правило, воспроизводящие подобное штатному воздействию на образец штатного материала.

Модельные испытания проводятся, когда в силу технических сложностей или значительной стоимости не удастся провести испытания натуральных элементов или когда для натуральных элементов не удастся воспроизвести штатные воздействия.

Основные достоинства модельных испытаний:

- существенно более низкая стоимость проведения испытаний по сравнению со всеми остальными видами испытаний;

- возможность более полного воспроизведения штатных условий эксплуатации;

- более широкие возможности для измерения максимально большого числа параметров, характеризующих исследуемый образец или явление;

- возможность воспроизведения предельных и аварийных режимов работы ввиду низких рисков и незначительного материального ущерба при аварии.

Главный и практически единственный недостаток модельных испытаний – неполное соответствие модели штатному элементу изделия РКТ. Для использования результатов модельных испытаний практически всегда необходимо прибегать к математическому моделированию, позволяющему перенести результаты модельных испытаний на оценки характеристик изделий РКТ. При этом точность и достоверность полученных оценок зависят не только от точности, достоверности и достаточности статистики результатов модельных испытаний, но и от качества используемых математических моделей. Несмотря на этот существенный недостаток модельные испытания являются единственным способом подтверждения соответствия требованиям ТЗ для значительной группы характеристик ракетно-космической техники.

Необходимо отметить, что модельные испытания обычно являются основой для разработки и последующей верификации (проверки) математических моделей. Преимущество модельных испытаний в этом случае объясняется, с одной стороны, возможностью измерения существенно большего набора параметров по сравнению с другими видами испытаний, а с другой – возможностью реализации гораздо большего набора режимов работы и внешних условий.

Комплексная программа экспериментальной отработки (КПЭО).

Обобщая изложенное, можно заключить, что характерной особенностью технологии экспериментальной отработки изделий РКТ является обязательное использование большого количества разного вида испытаний для оценки характеристик и подтверждения качества изделий.

Организационным документом, определяющим вид и количество испытаний, необходимых для подтверждения соответствия изделия РКТ требованиям технического задания, является КПЭО. Она разрабатывается для ЖРД, ДУ, космических аппаратов, ступеней РН и других сложных изделий РКТ.

В качестве примера рассмотрим построение КПЭО для отработки ЖРД. Комплексное планирование экспериментальной отработки имеет целью сокращение материальных и временных затрат на создание высоконадежных ЖРД, в первую очередь, сокращение числа ЖРД, необходимых для экспериментальной отработки (общего числа и числа окончательного варианта конструкции). По существу, речь идет о повышении эффективности испытаний ЖРД как одного из неперемных средств обеспечения надежности при экспериментальной отработке.

КПЭО разрабатывает предприятие – разработчик ЖРД на основе требований программы обеспечения надежности (ПОН), ТЗ на разработку ЖРД, эскизного проекта и плана устранения замечаний по эскизному проекту в сроки, определенные рабочими документами сквозного планирования.

Исходными данными для организации планирования экспериментальной отработки и составления КПЭО являются требования к назначению ЖРД и выполняемым им функциям, принципиальная схема, основные характеристики, внешние воздействующие факторы, требования по надежности и требования к плану контроля качества изготовления при поставках заказчику.

Объектами планирования при составлении КПЭО являются:

общее число двигателей, необходимых для отработки;

число двигателей окончательного варианта конструкции;

требования к информативности испытаний;

особенности контроля качества изготовления двигателей при поставках в эксплуатацию.

Исходные данные для определения параметров КПЭО:

установленные требования надежности;

доверительная вероятность γ , задаваемая для анализа надежности;

предполагаемый план контроля качества изготовления двигателя при поставках в эксплуатацию (как совокупность данных о виде и структуре контроля, составе контрольных операций, относительной выборке для периодических проверочных испытаний и условий испытаний);

начальная вероятность безотказной работы (ВБР) P_0 ;

температура роста надежности при отработке α ;

относительная выборка для периодических проверочных испытаний (ППИ) $c = n / N$, где n – объем выборки для ППИ; N – общее число изготовленных двигателей;

При разработке КПЭО составляют:

структурно-функциональную схему ЖРД с отметкой обрабатываемых структурно-функциональных элементов;

предварительный перечень параметров, по которым будут производиться оценка технического состояния каждого ЖРД и анализ надежности по результатам стендовых испытаний на определенном этапе отработки.

Проводится поагрегатный анализ критичных элементов и возможных аварийных ситуаций с разработкой рекомендаций по конструктивным мерам, принимаемым для их исключения, и способам проверки запасов параметров работоспособности в процессе отработки ЖРД .

С учетом требований нормативных документов определяются состав, обязанности и взаимоотношения организаций, участвующих в отработке ЖРД и его составных частей; документация, необходимая для подготовки и проведения различных видов испытаний; состав программ, отчетной документации и порядок ее оформления.

КПЭО оформляют в виде самостоятельного документа, включающего в себя пояснительную записку и таблицы-планы отработки структурно-функциональных элементов. КПЭО должна содержать:

перечень и состав обрабатываемых структурно-функциональных элементов с указанием критичных элементов;

виды испытаний и их последовательность;

цели и задачи испытаний;

порядок и объем отработки комплектов конструкторской (КД) и технической (ТД) документации на опытных образцах;

порядок и объем отработки новых технологических процессов (в том числе основанных на применении новых физических и химических принципов, методов изготовления и контроля ЖРД, а также критичных технологических процессов), характеристики и режимы которых должны быть экспериментально подтверждены или уточнены в целях обеспечения точности и стабильности технологических процессов;

планируемое число агрегатов, систем ЖРД, распределенное по видам испытаний с учетом выполнения требований надежности, и число испытаний;

порядок и объем отработки взаимного функционирования смежных систем при одновременной имитации различных воздействующих факторов, в том числе поражающих факторов ядерного взрыва (ПФЯВ),

порядок подтверждения требований ТЗ, в том числе надежности и безопасности эксплуатации;

порядок и объем отработки и подтверждения основных эксплуатационных требований;

порядок и объем отработки математического и информационного обеспечения;

порядок отработки технических средств противодействия иностранным техническим разведкам (ПД ИТР);

порядок реализации мероприятий метрологического обеспечения;

перечень программ и методик проведения и оценки результатов испытаний;

перечень средств испытаний и измерений, требования по их точности, перечень средств обработки информации, а также требования к безопасности обслуживающего персонала;

требования по обеспечению имитации эксплуатационных условий при стендовых испытаниях и проведению испытаний ЖРД на предельно допустимых режимах работы;

порядок поставки объектов испытаний, оборудования и документации;

отчетность по результатам испытаний.

Пояснительная записка к КПЭО включает пояснительный текст, который содержит:

краткое описание назначения, состава, особенностей конструкции и работы ЖРД;

требования, на соответствие которым отрабатывается ЖРД;

основные сведения о прототипах ЖРД, систем и агрегатов и степени их преемственности, в том числе об отказах и достигнутой надежности;

основные сведения об испытательной базе и возможностях ее совершенствования;

структурно-функциональную схему ЖРД.

Для каждого структурно-функционального элемента в КПЭО должны быть указаны:

вид испытаний;

объект испытаний;

число испытываемых экземпляров;

место проведения работ;

ответственные исполнители;

перечень средств измерений и обработки информации, требования к их точности;

вид отчетной документации.

Выбор объектов и видов испытаний по характеру процессов, протекающих в структурных элементах, осуществляют в соответствии с действующей нормативной базой [20, 21].

Отработка признается завершенной, если полностью выполнен объем работ и проверок, предусмотренный КПЭО, выполнены требования надежности, установленные ТЗ, и устранены причины всех отказов, проявившихся в ходе отработки. Более подробную информацию по КПЭО и обеспечивающей ее нормативной базе можно найти в [3, 22].

Список литературы к главе 1

1. **Пригожин И., Стенгерс И.** Время, хаос, квант. К решению парадокса времени / Пер. с англ. Ю.А. Данилова. 3-е изд. М.: Эдиториал УРСС, 2001.
2. **Прангишвили И.В.** Энтропийные и другие системные закономерности: Вопросы управления сложными системами. М.: Наука, 2003.
3. **Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем** / Л.Н. Александровская, В.И. Круглов, А.Г. Кузнецов и др.: Учеб. пособие. М.: Логос, 2003.
4. **Шеннон К.Э.** Работы по теории информации и кибернетике. М.: ИЛ, 1963.
5. **Винер Н.** Кибернетика, или управление и связь в животном и машине. 2-е изд. М.: Наука, 1983.
6. **Бриллюэн Л.** Научная неопределенность и информация. М.: ИЛ, 1966.
7. **Эшби У.Р.** Введение в кибернетику. М.: Наука, 1978.
8. **Клименко И.С.** Интерпретация принципа необходимого разнообразия Эшби применительно к управлению в социально-экономических системах // Вестник Российского нового университета. №4. 2012.
9. **Рабочие процессы в жидкостном ракетном двигателе и их моделирование** / под ред. А.С. Коротеева. М.: Машиностроение, 2008.
10. **Беляев Е.Н., Чванов В.К., Черваков В.В.** Математическое моделирование рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей. М.: Изд-во МАИ, 1999.
11. **Мартиросов Д.С., Рахманин В.Ф.** Методы функциональной диагностики ЖРД на основе математических моделей рабочих процессов и измеряемых параметров // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». 2002. № 2.
12. **Недайвода А.К.** Технологические основы обеспечения качества ракетно-космической техники. М.: Машиностроение, 1998.
13. **Альбрехт А.В., Арзуманов Ю.Л., Баталин Н.Н.** Оптимальное управление качеством сборки агрегатов изделий РКТ // Научно-технические разработки КБ «Салют» 2009–2011 гг. Вып.3 / Ю.О. Бахвалов, А.В. Альбрехт, Ю.А. Абросимов и др.; под общ. ред. Ю.О. Бахвалова. М.: Машиностроение / Машиностроение-Полет. 2012.
14. **Теория моделей в процессах управления. Информационный и термодинамический аспекты** / Б.Н. Петров, Г.М. Уланов, И.И. Гольденблат, С.В. Ульянов. М.: ИЛ, 1959
15. **ГОСТ 27.002–89.** Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения.
16. **Надежность технических систем: Справочник** / Ю.К. Беляев и др. М.: Радио и связь, 1985.
17. **Безопасность жизнедеятельности** / под ред. С.В. Белова. 2-е изд. М.: Высш. шк., 1999.
18. **Ветошкин А.Г., Марунин В.И.** Надежность и безопасность технических систем / под ред. А.Г. Ветошкина. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2002.
19. **Малкин В.С.** Надежность технических систем и техногенный риск: Учеб. пособие. Ростов-н/Д.: Феникс, 2010.
20. **ГОСТ В 21254–89.** Двигатели ракетные жидкостные. Общие требования к видам и программам испытаний.
21. **ГОСТ В 21262–75.** Двигатели ракетные жидкостные. Обеспечение и контроль надежности. Основные положения.
22. **Кучкин В.Н., Кучкин К.В., Сайдов Г.Г.** Теоретические основы разработки испытательного оборудования для ракетно-космической техники / под ред. Г.Г. Сайдова. М.: Машиностроение/Машиностроение-Полет, 2014.