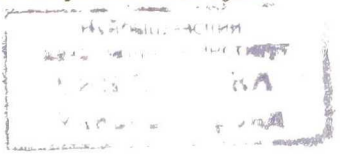
ДЛЯ ВУЗОВ

А.Е.Жуковский
В.С.Кондрусев
В.В.Окорочков

ИСПЫТАНИЯ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

2-е издание,
переработанное и дополненное

Рекомендовано Комитетом по высшей школе
Министерства науки, высшей школы
и технической политики
Российской Федерации
в качестве учебника для студентов
авиационных специальностей вузов



Москва
· Машиностроение ·
1992

ББК 39.65я73
Ж86
УДК 621.453/.457(075.8)

Рецензент кафедра Уфимского авиационного института

Жуковский А.Е., Кондрусев В.С., Окорочков В.В.

Ж86 Испытания жидкостных ракетных двигателей: Учебник для студентов авиационных специальностей вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 352 с.: ил.

ISBN 5-217-01332-X

Приведены цели, методы и особенности испытаний ЖРД различных типов как на стадии их отработки, так и в эксплуатации. Дана классификация испытаний ЖРД. Рассмотрены испытательные стенды и их системы, устройства для имитации натурных условий работы, применяемые методы и средства измерений, а также методы планирования и подготовки испытаний, обработки полученных результатов и оценки их точности. Второе издание (1-е издание вышло в свет в 1981 г.) существенно переработано и дополнено материалами об испытаниях ЖРДМТ и автоматизации испытаний. Книга предназначена для студентов авиационных специальностей вузов.

Ж $\frac{2705140400-106}{038(01)-92}$ 106–92

ББК 39.65я73

ISBN 5-217-01332-X

© Издательство "Машиностроение", 1981
А.Е. Жуковский, В.С. Кондрусев,
В.В. Окорочков, 1992

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий учебник является переработанным и дополненным изданием учебного пособия, вышедшего в издательстве "Машиностроение" в 1981 г. В новом издании более подробно изложен материал по обработке результатов испытаний, оценке их точности, методам математического планирования экспериментов, приведена классификация испытаний ЖРД, рассмотрены методы их подготовки и проведения. Особенности проведения испытаний отражены как для этапа создания двигателей, так и для этапа их эксплуатации – контрольных проверок при серийном производстве и при многоразовом использовании.

Учет таких особенностей испытаний ЖРД, как быстрое изменение параметров, большие тепловые и механические нагрузки, повышенная опасность, необходимость обеспечения имитации натурных условий, автоматизации управления и измерений, а также их дистанционности потребовали разработки специальных оборудования, методов и средств измерений. Поэтому в книге уделено значительное внимание специфике применяемых измерительных средств, испытательных стендов и комплексов, методам и устройствам имитации натурных условий и нагрузок.

В настоящее время, наряду с автоматизацией процессов управления и измерений, все более широко используют автоматизированные системы обработки и анализа полученной информации, поэтому в учебнике выделена специальная глава, посвященная приемам автоматизированной обработки результатов испытаний, управлению работой двигателя, структурам автоматизированных систем.

Существенно увеличен объем главы по моделированию испытаний, которое позволяет исследовать режимы, трудно воспроизводимые в обычных условиях, а также различные нештатные ситуации.

В книгу включена новая глава об особенностях испытаний ЖРДМТ, широко используемых в системах управления полетом ракет и космиче-

ских аппаратов. Основное отличие этих двигателей – работа в импульсных режимах продолжительностью до сотых долей секунды, когда имеет место существенная нестационарность процесса, которая требует при оценке их характеристик использования нестандартных методов и средств измерения, существенно отличающихся от применяемых при исследованиях маршевых двигателей.

Гл.1...3 и 8 написаны д-ром техн. наук, проф. В.С. Кондрусевым, гл.4, 6, 9 и подразд.7.2, 7.3...7.4 – д-ром техн. наук проф. А.Е. Жуковским, а гл.5 и разд.7.1 и 7.5 – инж. В.В. Окорочковым.

Авторы выражают глубокую благодарность канд. техн. наук А.Ф. Малееву, В.М. Окорочковой, а также д-ру техн. наук, проф. З.Г. Шайхутдинову и канд. техн. наук, доц. В.Д. Бикмухаметову за полезные замечания при подготовке книги к изданию.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АВМ – аналоговая вычислительная машина

АЦВМ – аналогово-цифровая вычислительная машина

АЦПУ – аналогово-цифровое печатающее устройство

ДУ – двигательная установка

ЖРД – жидкостный ракетный двигатель

ЖРДМТ– жидкостный ракетный двигатель малой тяги

ИИС – измерительно-информационная система

КК – космический корабль

КЛА – космический летательный аппарат

КПЭО – комплексная программа экспериментальной отработки

МТКК – многоразовый транспортный космический корабль

МТКС – многоразовая транспортно-космическая система

НИР – научно-исследовательские работы

ОКР – опытно-конструкторские работы

СА – спускаемый аппарат

САЗ – система аварийной защиты

ТЗ – техническое задание

ТНА – турбонасосный агрегат

ТУ – технические условия

ЭВМ – электронная вычислительная машина

ЭДА – электродинамическая аналогия

ЭДС – электродвижущая сила

Глава I
ВИДЫ ИСПЫТАНИЙ И ИХ НАЗНАЧЕНИЕ

1.1. ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЙ ЖРД

Испытаниям ракетных двигателей вообще, и ЖРД в частности, присущи определенные особенности, связанные как со спецификой процессов, происходящих в этих двигателях, так и с условиями их эксплуатации.

Первой особенностью испытаний ЖРД является их кратковременность. Работа двигателя при одном включении обычно длится от нескольких секунд до нескольких минут. Причем за это время осуществляются запуск двигателя, работа на нескольких режимах по давлению в камере сгорания $p_к$ и соотношению компонентов топлива K, выключение двигателя.

Кратковременность испытаний двигателя практически исключает возможность проведения оператором какого-либо анализа и корректировки режима работы в ходе испытания. В связи с этим процессы управления испытанием и измерения параметров должны быть максимально автоматизированы. Применяемые быстродействующие автоматические управляющие системы обеспечивают заданную последовательность режимов работы, позволяют моделировать разнообразные условия запуска и стационарной работы ракетного двигателя и одновременно обеспечивают надежную защиту его и испытательного оборудования от опасных перегрузок.

Кратковременность работы двигателя и необходимость автоматизации измерений потребовали разработки и применения специальных измерительных систем и оборудования. Причем к этим системам предъявляются два принципиальных требования – высокая точность измерения параметров на установившихся режимах и минимальная инерция при измерениях ряда физических величин на переходных режимах, в том числе на режимах запуска и выключения. Так как не всегда удается выполнить эти два требования в одной измерительной системе, то очень часто приходится для измерения одного параметра оснащать двигатель

измерительными приборами двух типов – для измерения медленноменяющихся величин, обеспечивающих высокую точность, и приборами для измерения быстроменяющихся величин, обладающих малой инерцией.

Вторая особенность испытаний ЖРД – это повышенная опасность. Она связана главным образом с применением высокоактивных топлив и, в первую очередь, окислителей, например таких, как жидкий кислород, фтор, соединения на основе азотной кислоты. Их использование предопределяет высокий уровень температуры в камере сгорания, а также быстрое развитие дефектов, из-за которых в некоторых случаях может возникнуть взрывоопасная ситуация. Кроме того, ряд ракетных топлив обладает токсичностью (гидразин и его соединения) и склонностью к взрыву при различных воздействиях (водород, перекись водорода).

Опасность усиливается при больших мощностях двигателей. Современные ЖРД имеют тяги, равные нескольким сотням и тысячам килоньютонов, а ДУ ракетных ступеней – нескольким десяткам тысяч килоньютонов. Естественно, что при испытаниях, особенно при проведении ОКР, нельзя полностью исключить возможность разрушений двигателей, последствия которых тем тяжелее, чем мощнее двигатель.

Перечисленные обстоятельства вызвали необходимость разработки специального испытательного оборудования и измерительной аппаратуры, а также особой организации проведения испытаний. Испытательное оборудование должно быть рассчитано не только на восприятие нагрузок от работающего двигателя, но и на возможность аварийного исхода испытания. Все это требует помимо соблюдения мер личной и общей безопасности максимального использования средств автоматизации при подготовке и проведении испытаний, обеспечения возможности дистанционных измерений и управления процессом.

Третья особенность испытаний – их высокая стоимость, которая связана с необходимостью создания или имитации условий реальной эксплуатации, и в первую очередь низкого давления окружающей среды, с большими расходами топливных компонентов, а зачастую и с уникальностью испытательного оборудования.

В связи с этим возникают требования высокой информативности испытаний и рационального их планирования, позволяющих получить более полные данные о двигателе за кратчайшее время, а значит, и при минимальных расходе топлива и затратах на создание двигателя.

Средствами достижения высокой информативности испытаний ЖРД являются:

измерение всех необходимых параметров с достаточной точностью;

дублирование измерений основных параметров;

практически непрерывная запись всех основных параметров.

Получаемый при этом объем информации должен давать практически полное представление о техническом состоянии ЖРД и физических процессах в нем в любой момент, включая и момент отказа. В качестве примера высокой информативности испытаний ракетных двигателей можно привести данные об объеме измерений по одному из американских ЖРД – при наземных огневых испытаниях этого двигателя измерялось 575 параметров.

Снижение стоимости отработки и, в частности, затрат на испытания ЖРД может быть достигнуто путем применения методов планирования испытаний и обработки экспериментальных данных, основанных на математической статистике, факторном анализе и теории надежности, а также различных способов моделирования процессов, происходящих в ЖРД при тех или иных условиях эксплуатации.

Применение указанных методов позволяет выявлять на ранней стадии отработки слабые места конструкции, а также оценивать надежность двигателей по ограниченному числу испытаний. При этом широко используются испытания на утяжеленных режимах.

Имеется множество видов испытаний ЖРД. Это связано с различным назначением самих ЖРД и с условиями их эксплуатации. ЖРД можно применять как в основных силовых установках летательных аппаратов, так и в системах управления и ориентации в качестве исполнительных органов. Естественно, что условия работы и требования к этим ЖРД существенно различаются, поэтому различны и методы их испытаний.

Применение в разных ЖРД топлив с различными физическими свойствами (криогенных, длительного хранения, токсичных, агрессивных и т.д.) также обусловливает различия в методиках испытаний и технике их проведения.

1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ ЖРД

1.2.1. Признаки классификации испытаний

Испытания ЖРД и их элементов можно классифицировать по различным признакам.

По наличию реакции горения или разложения рабочих компонентов топлива все испытания ЖРД, а также их отдельных узлов и систем подразделяются на о г н е в ы е и х о л о д н ы е.

По месту проведения их можно классифицировать как наземные и летные.

В зависимости от этапа, на котором проводятся испытания, их можно разделить на три основные группы: научно-исследовательские, опытно-конструкторские и эксплуатационные.

Каждая из перечисленных групп, в свою очередь, может быть подразделена на виды, объединяющие испытания с одинаковыми задачами. Например, опытно-конструкторские испытания можно разделить на сравнительные, уточняющие, доводочные, завершающие доводочные, летно-конструкторские, межведомственные, государственные летные.

Деление отдельных групп испытаний на виды в известной степени условно. В зависимости от назначения нового ЖРД, особенностей его конструкции, предъявляемых к нему требований и принятого на предприятии метода отработки могут быть дополнительно введены или исключены те или иные виды испытаний.

По испытываемой конструкции испытания можно разделить на испытания ЖРД в целом и автономные испытания – испытания узлов и агрегатов. Современный ЖРД представляет собой сложную систему, состоящую из отдельных узлов, агрегатов и их элементов. Поэтому отработке конструкции ЖРД в целом или испытаниям его в сборе может предшествовать цикл испытаний отдельных узлов или агрегатов с целью определения их характеристик.

Автономные испытания могут быть холодными и огневыми. Все холодные испытания по своей сути являются автономными. Огневым автономным испытаниям подвергаются камеры сгорания и газогенераторы.

1.2.2. Холодные и огневые испытания

Известно, что рабочий процесс ЖРД, работающего на химическом топливе, связан с горением или разложением какого-либо продукта, сопровождающимся выделением теплоты. Причем применение в ЖРД высокоэффективных, а зачастую агрессивных и токсичных компонентов делает процесс испытаний этих двигателей опасным и дорогостоящим. В то же время большинство узлов и агрегатов ЖРД работают в условиях, не связанных непосредственно с процессом горения топлива. В первую очередь это относится к элементам систем подачи, а также управления и регулирования ЖРД. Отработка этих элементов в значительной степени может быть проведена в лабораторных условиях с помощью автономных холодных испытаний.

Проведение холодных автономных испытаний позволяет уменьшить объем испытаний полноразмерных двигателей, что существенно сокращает затраты и сроки отработки вновь создаваемых ЖРД, делает процесс отработки и контроля качества элементов двигателя более безопасным, позволяет во многих случаях заменить уникальное испытательное оборудование более простым и надежным, допускает изменение режимов работы узлов в более широких пределах, чем это возможно на двигателе. Перечисленные особенности холодных испытаний явились причиной широкого внедрения их в практику работ по созданию новых ЖРД и контролю серийной продукции. Недостатком этих испытаний является трудность создания таких же условий работы, какие имеют место в полноразмерном двигателе.

К основным видам холодных испытаний можно отнести:

1. Гидравлические проливки трубопроводов, клапанов, регуляторов, форсунок, трактов охлаждения камер сгорания и газогенераторов и т.п., позволяющие определить фактическое сопротивление отдельных элементов конструкции и учесть его при расчете параметров настройки двигателя, оценить равномерность зон распыления топлива через отдельные форсунки и его качество, а также характер распределения компонентов топлива по поперечному сечению камеры. Проливки чаще всего производятся водой, а полученные данные пересчитываются затем на натурный компонент топлива и рабочий уровень расхода по формуле

$$\Delta p_{\text{нат}} = \Delta p_{\text{мод}} \frac{\rho_{\text{мод}}}{\rho_{\text{нат}}} \left(\frac{\dot{m}_{\text{нат}}}{\dot{m}_{\text{мод}}} \right)^2, \qquad (1.1)$$

где Δp, ρ и $\dot{m}$ – соответственно перепад давлений, плотность и массовый расход топлива. Индексы "мод" и "нат" относятся к параметрам натурного и модельного компонентов.

2. Испытания насосов, задачей которых является определение напорных, мощностных и кавитационных характеристик, используемых для контроля качества серийных насосов и настройки двигателя, а также для оценки конструктивных изменений в насосе в процессе их опытной отработки. При определении характеристик в качестве рабочего тела используется, как правило, вода.

3. Испытания турбин, проводимые как с исследовательскими целями, так и для определения фактических характеристик изготовленных турбин. Последние необходимы при расчете параметров

настройки двигателя. Автономные испытания турбин можно проводить на натурном газе, но чаще применяют модельные рабочие тела – воздух или специально подобранный газ, например фреон.

4. Испытания по отработке и проверке агрегатов систем управления и регулирования, в процессе которых производится проверка их функционирования в пределах заданного ресурса или числа включений, определение и отладка регулировочных характеристик, исследование влияния различных внешних факторов на их работу. Данные испытания можно проводить как на натурных, так и на модельных рабочих телах. Например, вместо жидкого кислорода можно использовать жидкий азот, что существенно упрощает технологию испытаний, так как исключается опасность взрыва или пожара.

5. Прочностные испытания узлов и агрегатов, которым подвергают значительное число элементов конструкции двигателя. Эти испытания отличаются большим разнообразием. Так, для замкнутых объемов (корпусные детали насосов и турбин, тракты охлаждения камер сгорания) проводят статические испытания методом гидроопрессовок. В необходимых случаях испытания проводят до разрушения. Крыльчатки насосов и диски турбин подвергаются динамическим испытаниям на специальных стендах при повышенной частоте вращения. У ряда элементов двигателя проверяют вибрационные характеристики.

Динамические испытания проводят на стендах, позволяющих длительно нагружать проверяемую конструкцию и изменять характер нагрузки. Так, топливные магистрали, корпуса насосов и полости форсуночных головок можно проверять на воздействие гидравлических ударов. При этом фиксируют состояние элементов ЖРД, напряжения и давления при "пиковых" нагрузках. Сами нагрузки могут быть однократными, циклическими, знакопеременными, с затухающими или постоянными частотой и амплитудой.

Вибрационные испытания, проводимые на вибростендах, имеют целью определение частоты и формы собственных колебаний методом установления резонансных частот.

Значительное внимание в процессе выполнения опытно-конструкторских работ уделяют испытаниям для проверки достаточности запасов по параметрам работоспособности таких напряженных элементов ТНА, как подшипники и уплотнения.

Важным моментом при проведении автономных прочностных испытаний является имитация нагрузок и достижение их соответствия натурным

условиям работы узлов. По данным этих испытаний выявляют "слабые" места и принимают решения о доработках конструкции или об изменении технологии производства. Полученные данные сравнивают с расчетными значениями прочностных характеристик и устанавливают их разброс.

6. Комплексные контрольные проверки электросистем и систем автоматики, которые проводят перед началом огневых испытаний и сводят к дистанционному контролю электроцепей пиро-, электро- и пневмоклапанов, датчиков, приводов и т.п. При контроле по тестовым программам проверяют функционирование узлов автоматики с включением соответствующих приводов. В процессе проверок осуществляют запись заданных сигналов и параметров с помощью осциллографов или магнитных регистраторов, по которой делают вывод о состоянии систем и возможности проведения огневого пуска.

7. Испытания гидравлических имитаторов двигателей, являющиеся испытанием всей системы топливоподачи совместно с системой автоматики. Влияние камеры сгорания здесь имитируется установкой дроссельных устройств на выходе из напорных магистралей по линиям горючего и окислителя. Дроссельные устройства (рис.1.1) подбирают таким образом, чтобы обеспечивались уровни давления на входе в камеру сгорания и массовые расходы компонентов топлива, эквивалентные натурным на заданном режиме.

В процессе этих испытаний обеспечивается динамическое функционирование всех агрегатов ЖРД (исключая камеру) практически без горения топлива, если не считать процесса в газогенераторе. Естественно, что замена камеры ее физической моделью (для заданного режима) делает эти испытания намного более безопасными и дешевыми по

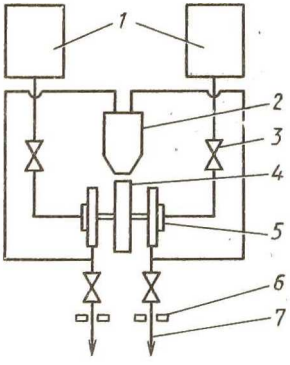


Рис.1.1. Схема имитатора двигателя:
1 – бак топливный; 2 – газогенератор; 3 – клапан; 4 – турбина; 5 – насос; 6 – устройство дроссельное, имитирующее сопротивление камеры сгорания; 7 – направления слива компонентов топлива в стендовые емкости

сравнению с испытаниями полноразмерного двигателя. Большим их достоинством является возможность проведения исследований всей системы топливоподачи на начальной стадии отработки ЖРД, когда камера сгорания может иметь недостаточную надежность.

Эти испытания можно проводить в лабораторных условиях.

Огневым испытаниям подвергаются "горячие" узлы ЖРД – камера сгорания и газогенератор, а также двигатель в целом.

Применительно к камере сгорания и газогенератору могут проводить автономные огневые испытания. Их ведут обычно на специальных стендах, оборудованных вытеснительной системой топливоподачи. Подобные стенды, дополненные соответствующей системой автоматики, позволяют получать значительный объем информации. В ходе автономных огневых испытаний отрабатывают процессы горения, добиваются его устойчивости, оценивают режимы охлаждения и уточняют энергетические характеристики. Важную роль играет отработка равномерности температурного поля в газогенераторе. Следует, однако, отметить, что для двигателей большой тяги с высоким значением $p_к$ создание стендов с вытеснительной системой подачи для автономной отработки камеры сгорания может оказаться дорогим и целесообразным.

Основным видом огневых испытаний являются испытания двигателей в сборе. Только этот вид испытаний может дать достаточно полную информацию о работоспособности ЖРД и его характеристиках. В процессе этих испытаний каждый узел работает в условиях, аналогичных эксплуатационным, при этом автоматически учитывается взаимное влияние узлов друг на друга. При проведении огневых испытаний выбирают циклограммы запуска и выключения, определяют действительные характеристики ЖРД и их стабильность в течение заданного ресурса, оценивают надежность ЖРД и его работоспособность при эксплуатации в системе ДУ.

В ходе огневых испытаний ЖРД работает как на установившихся, так и на переходных режимах. На установившихся режимах параметры ЖРД сохраняются практически неизменными по времени. К установившимся относятся режимы главной, предварительной и конечной ступеней изменения тяги. Под переходными или неустановившимися режимами понимают режимы, при которых параметры ЖРД изменяются во времени. К ним относятся: запуск, переключение режимов, автоматическое регулирование и выключение ЖРД.

В процессе огневых испытаний работу двигателя проверяют при различных сочетаниях внешних и внутренних факторов.

Под внешними факторами понимают физические воздействия на режим работы ЖРД, обусловленные внешними условиями. К ним относятся:

изменение давления компонентов топлива перед насосами;

изменение плотности топлива из-за изменения его температуры или сортности;

изменения положения органов настройки регуляторов тяги и соотношения компонентов топлива, вызываемые в условиях эксплуатации управляющими воздействиями со стороны системы управления ракетой.

Внутренними факторами принято называть физические воздействия на режим работы ЖРД, обусловленные особенностями изготовления конструкции. Они возникают из-за отклонений (в пределах допусков на изготовление) размеров или форм деталей, что в итоге приводит к разбросу характеристик узлов.

1.2.3. Наземные и летные испытания

ЖРД работают в специфических условиях, создаваемых на летательном аппарате при полете на различных высотах, и поэтому полная проверка их работы может быть осуществлена только при л е т н ы х и с п ы т а н и я х.

Однако летные испытания очень дорогие, и затраты на них будут резко возрастать из-за неудачных запусков в случае, когда испытываются недостаточно надежные ЖРД. Кроме того, летные испытания обладают меньшей информативностью по сравнению с наземными из-за ограниченного числа измерительных средств и телеметрических каналов, а также допускают значительно меньшее изменение факторов, влияющих на физические процессы в ЖРД. Поэтому возможно больший объем отработки должен осуществляться в наземных условиях.

В то же время при обычных стендовых испытаниях далеко не во всех случаях можно создавать условия, подобные эксплуатационным. В первую очередь это относится к ЖРД верхних ступеней ракет и космических аппаратов. Для достижения высокой эффективности отработки в наземных условиях стремятся обеспечить максимальную имитацию натурных условий эксплуатации и учесть влияние всех эксплуатационных факторов. Для этой цели создают установки, позволяющие обеспечить максимальное подобие натурных условий по основным влияющим факторам.

При проведении наземных испытаний решают следующие задачи: создать в процессе испытаний нагрузки, позволяющие оценить работоспособность элементов конструкции или выявить ее "слабые" места; определить характеристики конкретного элемента ЖРД или ЖРД в целом. Могут решать одну из поставленных задач или обе. При решении первой задачи испытания могут проводить на утяжеленных режимах для более раннего выявления всех возможных видов неисправностей и отказов.

Большое разнообразие требований, предъявляемых к наземным испытаниям, приводит к необходимости иметь значительное число стендов для поагрегатной отработки и проверки узлов и ЖРД в целом.

При испытаниях на земле ЖРД верхних ступеней ракет имитация высотных условий, обеспечивающих возможность отработки запуска и выключения ЖРД, а также безотрывное течение газа в сопле, достигаются использованием на стендах барокамер или вакуумных установок, оборудованных эжекторами и выходными диффузорами. Например, для испытаний кислородно-водородного двигателя J-2 с тягой 883 кН использовали установку, смонтированную в бетонной трубе-шахте диаметром 30,5 м и глубиной 80 м,обеспечивающей разрежение, соответствующее высоте 38 км.

Так как на режим работы ЖРД и его работоспособность могут также оказывать существенное влияние температура компонентов топлива и его конструкция, то в ряде случаев проводят термовакуумные испытания на специально создаваемых для этой цели стендах.

Совместную работу систем ДУ и ЖРД проверяют наземными комплексными испытаниями в составе ракетной ступени. Например, проводили наземные огневые испытания первой ступени ракеты-носителя "Сатурн-5", в процессе которых ЖРД, развивающие суммарную тягу 33350 кН, работали примерно 150 с.

Интенсивная наземная отработка ЖРД и широкое использование установок, обеспечивающих имитацию реальных условий эксплуатации, позволяют существенно сократить объем дорогостоящих летных испытаний. Даже для столь сложной ракеты-носителя, как "Сатурн-5", оказалось возможным благодаря всесторонней наземной отработке ограничить летные испытания двумя пусками, хотя вначале было запланировано пять полетов.

Но несмотря на то, что многие воздействия, специфические для летных условий, могут достаточно хорошо воссоздаваться при тех или иных видах наземных испытаний, все же не представляется возможным

достичь полной аналогии работы ЖРД на стенде и в полете. Не всегда удается обеспечить при наземных испытаниях достаточно полную имитацию вибраций, невесомости, глубокого вакуума, осевых перегрузок. Отсутствие невесомости и глубокого вакуума не позволяет полностью воспроизводить динамику запуска ЖРД, предназначенных для использования на верхних ступенях ракет. В результате действия перегрузок, которые, например для ЖРД зенитных ракет, являются значительными, могут быть нарушены нормальный впрыск топлива в камеру сгорания и процесс горения в ней.

Таким образом, проверка совместной работы всех элементов и систем ЖРД и летательного аппарата в условиях эксплуатации является обязательной и может быть осуществлена только в процессе летных испытаний. Именно поэтому летные испытания рассматривают как обязательный этап отработки ЖРД и приемки его в эксплуатацию.

Летные испытания вновь разрабатываемого или модифицированного ЖРД, проводимые для проверки соответствия его характеристик техническим требованиям, в процессе которых можно производить дополнительную доводку ЖРД, называют летно-конструкторскими испытаниями (ЛКИ).

Методики проведения летных испытаний и их объем могут существенно различаться. Они зависят от ряда факторов и, в первую очередь, от назначения испытываемого ЖРД и стоимости летных испытаний. Так, летно-конструкторские испытания ЖРД относительно небольших беспилотных летательных аппаратов можно начинать проводить на ранней стадии разработки программы с целью выявления "слабых" мест конструкции.

Для мощных же ракетных систем, и особенно для пилотируемых летательных аппаратов, летные испытания проводят только на последней стадии отработки ЖРД, когда он обладает достаточно высокой надежностью.

Результаты летно-конструкторских испытаний могут быть оценены как зачетные и достаточные для заключения о возможности передачи ЖРД в эксплуатацию. Если же проведенные летно-конструкторские испытания не позволяют сделать такое заключение, то предусматривается проведение государственных летных испытаний (ГЛИ), являющихся заключительным этапом проверки разрабатываемого ЖРД.

Основной недостаток летных испытаний – их высокая стоимость – может быть частично устранен проведением их на серийных ракетах, которые таким образом используются в качестве своеобразных летаю-

щих лабораторий. Например, первые летные испытания двигателя J-2 до установки его на ракету-носитель "Сатурн-5" проходили на второй ступени ракеты-носителя "Сатурн-1В", двигатель LR-10 до установки его на ракету-носитель "Сатурн-1В" испытывали в составе ракеты-носителя "Атлас-Центавр". Однако завершающие летные испытания обязательно должны быть проведены на ракете, для которой разрабатывается двигатель.

1.2.4. Научно-исследовательские испытания

Современное состояние теории и практики конструирования не позволяет без предварительных экспериментальных исследований осуществить разработку нового двигателя, отличающегося от предыдущих схемой или принципом действия, конструкционными материалами или топливами, более высокими механическими и тепловыми нагрузками, лучшими параметрами. Проект перспективного двигателя базируется, как правило, на результатах предварительно проведенных НИР, значительная часть которых требует выполнения специальных исследовательских испытаний.

Научно-исследовательские испытания проводят в НИИ, лабораториях ОКБ и вузов. В их процессе можно решать как общетеоретические, так и чисто прикладные задачи. Основная цель научно-исследовательских испытаний – способствовать созданию научного задела, необходимого для дальнейшего развития и совершенствования ЖРД.

Результаты этих испытаний позволяют объяснить отдельные явления, уточнить и дополнить существующие, а иногда и создать новые теории. Их используют при подготовке научно обоснованного проекта ЖРД новой схемы, что уменьшает объем и сроки выполнения опытно-конструкторских работ. В соответствии с результатами проводимых исследований вырабатывают рекомендации, внедрение которых позволяет улучшить характеристики и повысить качество перспективных изделий. Научно-исследовательские испытания проводят как на ЖРД, так и на отдельных его элементах.

Проведение научных исследований на ЖРД и их полноразмерных узлах дорого и не всегда удобно, поэтому во всех случаях, когда это допустимо, их заменяют м о д е л ь н ы м и и с п ы т а н и я м и. Моделирование позволяет:

значительно уменьшить мощности, потребляемые на эксперимент;

снизить затраты на строительство стендов и экспериментальное оборудование;

вести эксперимент в более удобных условиях (при приемлемых температурах и давлениях, замене токсичных или взрывоопасных рабочих тел безвредными и т.д.);

приспособить модель специально для целей эксперимента.

В большинстве случаев полное моделирование выдержать трудно, поэтому осуществляют частичное моделирование, т.е. не выдерживают равенство тех критериев подобия, которые в конкретных условиях эксперимента не оказывают существенного влияния на исследуемый процесс.

Подобие процессов, происходящих в тех или иных узлах ЖРД, процессам, протекающим в модели, далеко не всегда удается обеспечить относительно простыми методами. Это, в первую очередь, относится к динамическим процессам запуска ЖРД и неустойчивого горения. Поэтому исследования таких процессов проводят чаще всего на полноразмерных ЖРД или на сложных установках, позволяющих осуществить достаточно полную имитацию рабочих условий.

Главным требованием, предъявляемым к установкам для проведения научно-исследовательских испытаний, является их максимальная универсальность, позволяющая: изучать различные объекты одного класса, проводить разнообразные измерения, отделять влияние на характеристики объекта одних воздействий или явлений от других.

1.2.5. Опытно-конструкторские испытания

В процесса выполнения ОКР по созданию нового ЖРД проводят комплекс опытно-конструкторских испытаний, осуществляемых в несколько этапов. Вначале проводят этап исследовательских испытаний, затем осуществляют предварительные и, наконец, приемочные испытания. Каждый из этапов включает несколько видов испытаний. Их необходимость, состав и последовательность в процессе ОКР устанавливает разработчик ЖРД с учетом требований, существующих в отрасли. Весь объем испытаний при выполнении ОКР проводят в соответствии с КПЭО ЖРД, составленной с таким расчетом, чтобы заданные параметры и надежность нового ЖРД были обеспечены в минимальное время и с минимальными затратами средств. В КПЭО включают предварительно разработанные частные программы по исследованию характеристик отдельных элементов ЖРД и отлаживанию совместной их работы во всех возможных условиях эксплуатации.

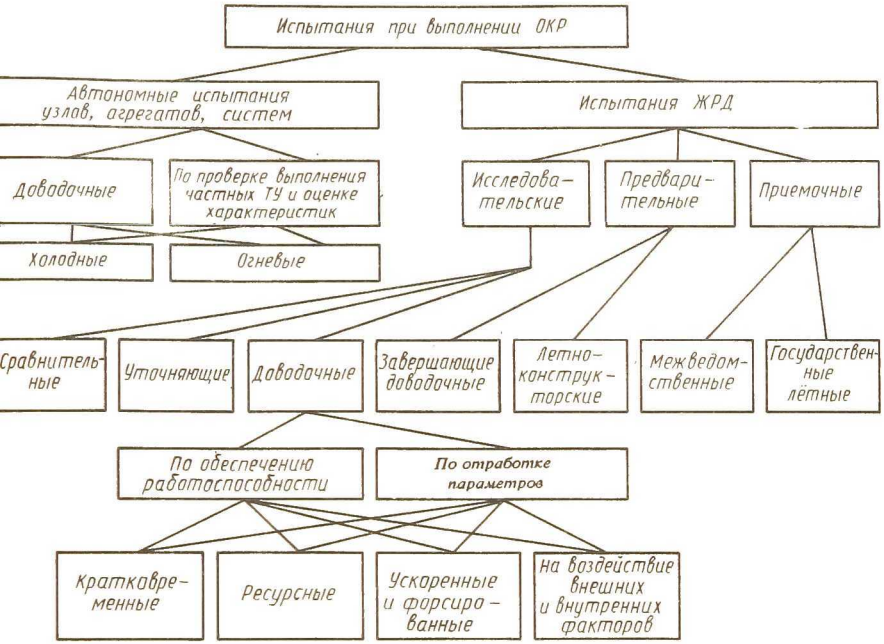


Рис. 1.2. Классификация испытаний в процессе ОКР по созданию ЖРД

В отличие от научно-исследовательских испытаний испытания при выполнении ОКР проводят только на реальных конструкциях разрабатываемого узла или ЖРД в целом.

Возможная классификация испытаний в процессе ОКР по созданию ЖРД представлена на рис.1.2.

На этапе исследовательских испытаний проводят сравнительные, уточняющие и доводочные испытания. Целью *сравнительных испытаний* является принятие исходного варианта конструкции ЖРД. На ранней стадии ОКР по созданию нового ЖРД может быть заложено несколько его вариантов, имеющих принципиальные отличия в схеме или конструкции основных узлов. Сравнительные испытания позволяют выбрать наилучший вариант, который принимают в качестве исходного для дальнейшей доводки.

Уточняющие испытания – это испытания по предварительной проверке запасов по параметрам работоспособности ЖРД и определению возможности выполнения ТЗ на разрабатываемый ЖРД. Первые ЖРД, изготовленные по проектной документации, как правило, не обеспечивают всех требований ТЗ по работоспособности и

характеристикам, поэтому необходимо четко представлять исходный уровень важнейших параметров и иметь уверенность, что в результате доводки могут быть получены все заданные характеристики создаваемого ЖРД.

Цель доводочных испытаний (ДИ) – доработка конструкции ЖРД до соответствия его характеристик ТЗ. Это достигается путем выявления и устранения факторов, ухудшающих характеристики и снижающих запасы по параметрам работоспособности ЖРД. Доводочным испытаниям подвергают как отдельные элементы ЖРД – узлы, агрегаты, системы (автономные испытания), так и ЖРД в сборе.

В процессе доводочных испытаний решают следующие задачи, обеспечивающие выполнение ТЗ:

отработка конструкции элементов ЖРД и проверка правильности выбора материалов и технологии изготовления деталей для обеспечения прочности и надежности;

доводка рабочего процесса ЖРД и системы регулирования до уровня, указанного в ТЗ;

отработка эксплуатационных характеристик ЖРД и систем его защиты при воздействиях различных внешних и внутренних факторов.

Значительная часть доводочных испытаний сводится к поиску лимитирующего структурно-функционального элемента ЖРД. Под структурным элементом ЖРД понимают одну его составную часть (или несколько частей), представляющую один объект испытания или один объект, выделенный для исследования надежности. Функциональный элемент – это элемент, выполняющий функцию ЖРД, выделенную для исследования. Под структурно-функциональным элементом подразумевают элемент, составленный из структурного и функционального элементов, принадлежащих одной составной части ЖРД, а под лимитирующим структурно-функциональным элементом – элемент, обладающий минимальной надежностью. В процессе доводки ЖРД непрерывно ведут поиск лимитирующих структурно-функциональных элементов, разработку мероприятий по повышению их надежности до уровня требований ТЗ и последующую проверку эффективности этих мероприятий.

КПЭО предусматривается опережающая и возможно более полная отработка отдельных узлов, агрегатов и систем ЖРД на специальных стендах (автономные испытания). Для более раннего обнаружения потенциально "слабых" мест конструкции испытания ведут при наработке и нагрузках, существенно превышающих требования ТЗ.

Автономные испытания завершают проверкой на соответствие всем требованиям (включая надежность) частных ТУ на данный элемент конструкции ЖРД.

Однако, как свидетельствует практика отработки ЖРД, в процессе автономных испытаний выявляется лишь 40...50 % всех конструкторско-технологических недостатков. Именно поэтому необходимо проведение доводочных испытаний полноразмерных ЖРД. Кроме того, оценка действительных характеристик ЖРД, и в первую очередь тяги, удельного импульса тяги, надежности, может быть произведена только по результатам его испытаний.

Доводочные испытания полноразмерных ЖРД ведут по двум направлениям: с целью достижения установленных ТЗ значений основных параметров ЖРД и его эксплуатационных характеристик и обеспечения заданного уровня надежности (отработка прочностных характеристик).

Доводочные испытания полноразмерных ЖРД необходимы также для окончательной отработки рабочего процесса в камере сгорания и газогенераторе. В период их проведения опробывают различные варианты конструкции, вносят те или иные изменения в нее. По результатам внесенных в ЖРД конструктивных изменений в процессе доводочных испытаний уточняют также параметры ТНА и совершенствуют его конструкцию.

Исключительно важными и сложными являются работы по обеспечению надежного запуска вновь создаваемого ЖРД. Они включают автономную отработку отдельных агрегатов (клапанов, регуляторов, стартеров и т.д.) и проведение большого объема доводочных испытаний непосредственно на ЖРД. В процессе отработки ЖРД с помощью расчетно-экспериментальных методов должны быть подобраны взаимосвязи между отдельными агрегатами и их временное функционирование, обеспечивающие безаварийный запуск и заданный закон изменения параметров во времени.

Дополнительные сложности возникают с отработкой ЖРД, запуск которых производится на больших высотах. В этом случае на процесс оказывают влияние низкое давление окружающей среды, невесомость и практически неограниченная тепловая поглощающая способность окружающей среды. В связи с этим создают специальные стенды, позволяющие в той или иной степени имитировать действительные условия эксплуатации. Для проверки влияния невесомости на процесс запуска используют летающие лаборатории на базе специально оборудованных самолетов. В зависимости от типа самолета и траектории его полета можно создавать условия невесомости различной продолжительности.

Например, на американских самолетах С-131 и КС-135 продолжительность невесомости составляет 12...15 с, а на сверхзвуковом самолете Х-15 она может достигать 4 мин.

Помимо запуска в ходе доводки ЖРД должен быть отработан и его останов. Основные требования к останову заключаются в обеспечении сохранности ЖРД после выключения и заданного значения импульса последействия ЖРД.

Для ЖРД многократного использования увеличивается объем испытаний по отработке и проверке надежного функционирования систем зажигания и автоматики, рассчитанных на многократное включение. В процессе испытаний подобных ЖРД отрабатывают также методы контроля их технического состояния после проведения огневых запусков. Особое внимание уделяют и методам очистки ЖРД от остатков компонентов топлива после их работы и подготовке к длительному хранению.

Другое важнейшее назначение доводочных испытаний – обеспечение необходимых прочностных характеристик ЖРД. В ходе этих испытаний выявляют "слабые" места, оценивают фактическую несущую способность элементов при воздействии нагрузок, разрабатывают мероприятия по совершенствованию конструкции и технологического процесса, определяют их эффективность и устанавливают количественные показатели надежности ЖРД.

Испытания ведут поэтапно с предварительной прочностной доводкой элементов ЖРД. Причем в зависимости от назначения элемента видоизменяют и метод испытаний. Так, корпусные узлы, представляющие собой замкнутые объемы (корпуса насосов и турбин), а также камера сгорания и газогенератор подвергаются гидроопрессовкам, крыльчатки насосов и диски турбин – динамическим испытаниям при повышенной частоте вращения. При этом одновременно оценивают герметичность полостей и соединений, сварных швов и мест пайки. Проверяют запас прочности после многократного статического и динамического нагружений давлением жидкости или газа. Ряд агрегатов ЖРД проходит на специальных стендах вибрационные испытания. В некоторых случаях при автономных испытаниях оценивают режимы охлаждения камеры сгорания и газогенератора при различных, в том числе неблагоприятных, сочетаниях внешних и внутренних факторов.

После получения необходимых прочностных характеристик элементов начинается этап доводочных огневых испытаний полноразмерного ЖРД. Испытания проводят с постепенным наращиванием уровня тяги и длительности работы. После достижения номинальных характеристик проводят испытания на ресурсное время, оговоренное в ТЗ на раз-

работку ЖРД, с изменением режимов по давлению в камере и соотношению компонентов топлива, соответствующим условиям эксплуатации на ракете.

Так как на уровень параметров и степень нагруженности элементов ЖРД существенное влияние оказывают внешние и внутренние факторы, то должны быть проведены испытания и по проверке их влияния. С этой целью проводят серию специальных испытаний с наиболее неблагоприятным сочетанием факторов. Число влияющих факторов для современных ЖРД, являющихся сложными системами, весьма велико. Необходимость проверки совместного влияния различных факторов, заданных ТЗ на ЖРД, на предельных (максимальном и минимальном), а иногда и на промежуточных уровнях обусловливает большое число их сочетаний, которое практически не может быть реализовано. Сокращения числа проверочных испытаний достигают с помощью современных методов планирования эксперимента и учета влияния факторов и их сочетаний на исследуемый параметр. Виды факторов, их сочетания и уровни подбираются таким образом, чтобы были созданы наиболее напряженные, но практически возможные условия работы для каждого из основных элементов ЖРД.

Имитация внешних факторов (температуры и давления компонентов топлива, команд системы управления ракеты на изменение режимов работы ЖРД, температуры конструкции, динамических импульсов и т.п.) создается стендовыми системами. Влияние внутренних факторов, обусловленных особенностями конструкции и технологического процесса изготовления, на выходные параметры ЖРД – тягу и соотношение компонентов топлива – компенсируется настройкой. Однако при этом не устраняется разброс значений внутренних параметров (давлений за насосами, температуры газа перед турбиной и т.д.) и при определенных эксплуатационных условиях они могут стать критическими.

Для исключения влияния разброса неконтролируемых случайных факторов и допустимых отклонений в точности настройки, которое может привести к неполучению заданного уровня проверяемого параметра, испытания проводят при значениях внешних факторов, превышающих заданные в ТЗ. Это превышение может достигать 15 % и более от номинального уровня.

Выявление "слабых" мест конструкции в определенной степени связано со случайными проявлениями отказов. Следовательно, должны быть созданы условия, способствующие обнаружению "слабых" мест. Достигается это тем, что при доводке ЖРД не ограничиваются проведением только ресурсных испытаний на режимах, установленных ТЗ. В

настоящее время широко используют следующие способы поиска лимитирующего структурно-функционального элемента ЖРД:

при подготовке испытаний или при проведении их устанавливают значения факторов, влияние которых исследуют, превышающие нормальные эксплуатационные пределы;

испытания проводят до отказа или до сигнала аварийной защиты, свидетельствующего о потере работоспособности или появлении дефекта, препятствующего дальнейшей нормальной работе ЖРД;

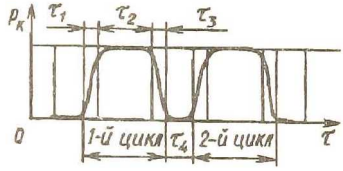
испытания проводят до определенного предела изменения факторов.

При этом испытания проводят на время, превышающее указанное в ТЗ, многократно испытывают один и тот же ЖРД, чем достигают увеличения наработки каждого из ЖРД по времени и числу циклов, осуществляют утяжеление режимов работы. Последнее обеспечивается при проведении форсированных испытаний специальной настройкой ЖРД на предельные значения основных параметров ($p_к$, K) путем широкого варьирования режимов работы соответствующими регулирующими элементами. В ряде случаев проводят комплексное утяжеление испытаний одновременно по параметрам, продолжительности работы и числу включений. Предельные значения параметров утяжеленных режимов ЖРД не должны превышать значений, при которых изменяется физическая картина исследуемого процесса.

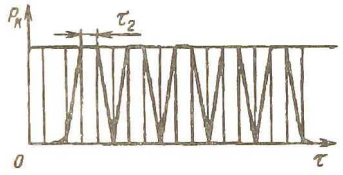
В процессе доводочных испытаний исследуют также работу ЖРД при некоторых аварийных ситуациях. Например, при доводке двигателя F-1 проверяли 12 видов заранее вносимых неисправностей, которые возможны в полете.

Для отдельных типов ЖРД возникает необходимость в проведении ускоренных испытаний. Примером могут служить системы коррекции движения КА, предназначенных для полетов к дальним планетам, гарантийное время работы исполнительных органов (ЖРД) которых может составлять годы. В таком случае ужесточают условия работы, благодаря чему становится возможным сокращение времени испытания. Подобные системы обычно работают в циклическом режиме (рис.1.3, *а*). При ускоренных испытаниях может быть исключена пауза τ_4 (рис.1.3, *б*). Уже это обстоятельство приводит к ужесточению процесса работы ЖРД. Сокращают также время выдержки τ_2 на режиме. Уровень основных параметров на рабочем режиме устанавливают более высоким, чем в условиях эксплуатации. Число циклов сохраняют неизменным. На рис.1.3 τ_1 и τ_3 – время переходных процессов.

Рис. 1.3. Циклические режимы работы



а



б

После этапа исследовательских испытаний, основным звеном которого являются доводочные испытания, начинается этап предварительных испытаний.

На этапе предварительных испытаний проводят завершающие доводочные (ЗДИ) и летно-конструкторские испытания.

Целью завершающих доводочных испытаний является подтверждение соответствия характеристик ЖРД ТЗ и оценка возможности предъявления его к приемочным испытаниям. В ТЗ на разработку ЖРД в числе прочих характеристик указываются значения параметров, характеризующих его надежность, которые должны быть экспериментально подтверждены. Заданные значения параметров, характеризующих надежность разрабатываемого ЖРД, подтверждаются конструкторской отработкой. Основным материалом для оценки надежности являются результаты завершающих доводочных испытаний, лишь на начальном этапе которых возможна незначительная корректировка конструкции. Испытания, подобные завершающим доводочным испытаниям, называют иногда также квалификационными.

Надежность может быть оценена по результатам всех испытаний, проведенных на ЖРД, имеющих штатную, т.е. окончательную, конструкцию основных элементов. Естественно, что к концу доводочных работ число таких испытаний относительно невелико, так как в процессе отработки ЖРД непрерывно изменяют его конструкцию в связи с поиском оптимального варианта. В то же время для количественной оценки надежности ЖРД требуется значительное число испытаний. Так, для подтверждения нижней границы вероятности безотказной работы $p_н \geqslant 0{,}99$ при доверительной вероятности $\gamma = 0{,}95$ требуется примерно 300 безотказных ресурсных испытаний. Для их проведения потребовалось бы значительное время и большие средства. Сокращение времени и средств может быть достигнуто проведением многократных испытаний ограниченного числа ЖРД, увеличением времени их непрерывной работы и утяжелением режимов. Так, при выполнении программы

завершающих доводочных испытаний каждый ЖРД F-1 фирмы "Рокетдайн" испытывали в среднем 35 раз, а средняя суммарная наработка на каждый экземпляр составила 35 700 с (при полетном времени работы 160 с).

Завершающие доводочные испытания по методике проведения в значительной степени повторяют доводочные испытания с утяжеленными режимами работы и испытания на неблагоприятное сочетание внешних и внутренних факторов.

На конечном этапе завершающих доводочных испытаний, когда подтвержденный уровень надежности разрабатываемого ЖРД достаточно высок, проводят стендовые испытания ЖРД в составе ДУ. Основной целью этих испытаний является предварительная проверка достаточности имитации стендом условий работы ЖРД в составе ДУ, а также предварительная оценка работоспособности ЖРД в составе ДУ. Одновременно проверяют влияние ЖРД на работоспособность систем ДУ. Таким образом, в процессе этих испытаний проверяют совместную работу ЖРД и ракетных систем. Если на ступени ракеты установлены несколько ЖРД, то оценивают их взаимное влияние, в частности, на тепловое состояние, и их влияние на характеристики ступени.

Испытания в составе ДУ проводят большей частью в земных условиях. В некоторых случаях, когда уровень параметров ДУ позволяет использовать высотные стенды, испытания ведут с имитацией эксплуатационных условий. Например, в высотных условиях проводили испытания второй ступени ракеты-носителя "Титан-3" и третьей ступени ракеты-носителя "Сатурн-5".

При стендовых испытаниях ЖРД в составе ДУ проверяют и при необходимости окончательно отрабатывают запуск и выключение ЖРД при "провалах" давления и гидроударах в штатных магистралях подвода компонентов топлива, соответствующих эксплуатационным, оценивают работоспособность ЖРД в течение ресурса со штатными системами наддува баков и отбора компонентов топлива на ракетные нужды при натурных вибронагрузках и тепловом режиме конструкции, определяют уровень донного давления в стартовых условиях, значение и разброс импульса последействия и т.п.

В зависимости от конкретных требований к ЖРД, условий его эксплуатации и особенностей конструкции в процессе этих испытаний можно решать и другие задачи.

Летно-конструкторские испытания опытных ЖРД проводят, как правило, после успешного завершения их

стендовых испытаний в составе ДУ. Основной задачей летно-конструкторских испытаний является проверка и подтверждение работоспособности ЖРД и проверка соответствия его характеристик ТЗ в реальных условиях эксплуатации. В процессе летно-конструкторских испытаний можно производить дополнительную доводку ЖРД, т.е. внесение в его конструкцию изменений, необходимость которых выявилась в ходе летных испытаний. В некоторых случаях для проверки работоспособности ЖРД и его характеристик первый этап летно-конструкторских испытаний осуществляют на менее дорогих серийных ракетах. Но окончательное заключение о работе ЖРД в фактических эксплуатационных условиях может быть сделано только по результатам летных испытаний в составе той ракетной системы, для которой он разрабатывался.

Задачами летно-конструкторских испытаний являются:

проверка функционирования ЖРД в условиях эксплуатации;

проверка совместной работы ЖРД и ракетных систем в штатных условиях;

проверка и подтверждение характеристик ЖРД, заданных ТЗ на разработку, в условиях эксплуатации;

проверка достаточности и эффективности наземной отработки, а также подтверждение заявленного уровня надежности;

специальные исследования, связанные с особенностями конкретной конструкции или эксплуатации ЖРД и ракеты.

Летно-конструкторские испытания проводят по программе, согласованной со всеми заинтересованными организациями. При разработке методики обработки и анализа результатов испытаний должно быть обращено особое внимание на достаточность выбранного объема измеряемых параметров и точность их измерения. В противном случае может оказаться, что полученная информация будет в определенной степени обесценена, так как не позволит дать ответ на некоторые вопросы, поставленные перед летно-конструкторскими испытаниями.

Полученную при проведении летно-конструкторских испытаний информацию подвергают вначале оперативному (послеполетному), а затем полному анализу.

Для оперативного анализа выбирают небольшое число параметров, наиболее полно характеризующих работу ЖРД. Выясняют, нормально ли он функционировал и какие заметные аномалии имели место в процессе его работы. Обычно оперативный анализ сводится к просмотру графического материала, из которого могут быть определены явно выражен-

ные аномалии. При этом широко используют автоматизированные системы анализа, позволяющие осуществлять непосредственный ввод информации с магнитных лент телеметрических систем в вычислительную машину в реальном масштабе времени, и тогда оперативный анализ может осуществляться методом опроса параметр в норме – не в норме. Для этого предварительно определяют границы возможного изменения контрольных параметров с учетом влияния внешних и внутренних факторов.

Полный анализ производят после дешифровки и оценки достоверности телеметрической информации. В результате его определяют основные характеристики ЖРД и параметры переходных режимов, включая запуск и выключение, фактические виброперегрузки в отдельных точках ЖРД и уровень пульсаций давления в топливных магистралях, тепловые характеристики элементов конструкции на различных режимах работы, оценивают точность настройки и т.д.

Для оценки основных параметров ЖРД и, в частности, тяговых характеристик используют также данные траекторных измерений и баллистические характеристики летательного аппарата.

В ходе летно-конструкторских испытаний возможно проявление некоторых аномалий, связанных с работой собственно ЖРД или смежных с ним систем. Поэтому по результатам летно-конструкторских испытаний можно вносить определенные изменения в конструкцию ЖРД или ракетной системы.

Проявление любой неисправности в ЖРД сопровождается переходным процессом и изменением параметров. При этом отклонение параметров от расчетных значений зависит от характера неисправности. Для выяснения причин неисправностей используют аналитические и экспериментальные методы. В необходимых случаях перед окончательным заключением о причине аномалии имитируют предполагаемые неисправности в стендовых условиях, фиксируют характер изменения контрольных параметров. Аналогия в изменении параметров при летно-конструкторских и стендовых испытаниях является дополнительным доказательством правильности принятой версии.

Заключение о выполнении задач испытания проводят по каждому запуску. На основании полученной информации производят необходимые изменения в ЖРД и соответственно корректируют задачи и программы последующего испытания.

Основными критериями выполнения всего объема летно-конструкторских испытаний могут служить:

уточнение основных параметров и характеристик ЖРД;

подтверждение его эксплуатационных характеристик;

подтверждение и уточнение достигнутого уровня надежности.

Успешное окончание завершающих доводочных и летно-конструкторских испытаний является основанием для предъявления ЖРД на приемочные испытания, к которым относятся межведомственные (МВИ) и государственные летные испытания.

Межведомственными испытаниями должно быть подтверждено соответствие основных технических характеристик ЖРД требованиям ТЗ и показано наличие запасов его работоспособности.

Межведомственные испытания проводит комиссия из представителей нескольких заинтересованных организаций. Программа этих испытаний предварительно согласовывается с представителями заинтересованных организаций и утверждается их руководством. Она включает проведение ресурсных и специальных испытаний на воздействие внешних факторов.

До начала межведомственных испытаний должна быть проведена также серия специальных испытаний: транспортных – с целью подтверждения работоспособности ЖРД после перевозки транспортными средствами на заданные расстояния; климатических – после длительного хранения при предельных температурно-влажностных режимах и т.д.

Основными задачами межведомственных испытаний являются:

установление соответствия действительных параметров и характеристик ЖРД заданным в ТУ на проектирование;

проверка достаточности и эффективности проведенной отработки ЖРД;

установление эталона для серийного производства.

Комиссия по проведению межведомственных испытаний до начала испытаний знакомится со всей конструкторской, технологической и эксплуатационной документацией, с историей доводки, с результатами всех стендовых и летно-конструкторских испытаний и другими материалами. На основании рассмотрения этих документов она дает заключение о допуске ЖРД к испытаниям. После проведения испытаний ЖРД подвергают разборке и дефектации. Работа комиссии завершается составлением акта о проведении межведомственных испытаний. Успешное их завершение служит основанием для рекомендации ЖРД к внедрению в серийное производство. Техническая документация, соответствующая ЖРД, прошедшим межведомственные испытания, эталонируется.

В некоторых случаях межведомственные испытания ЖРД совмещают с межведомственными испытаниями ДУ.

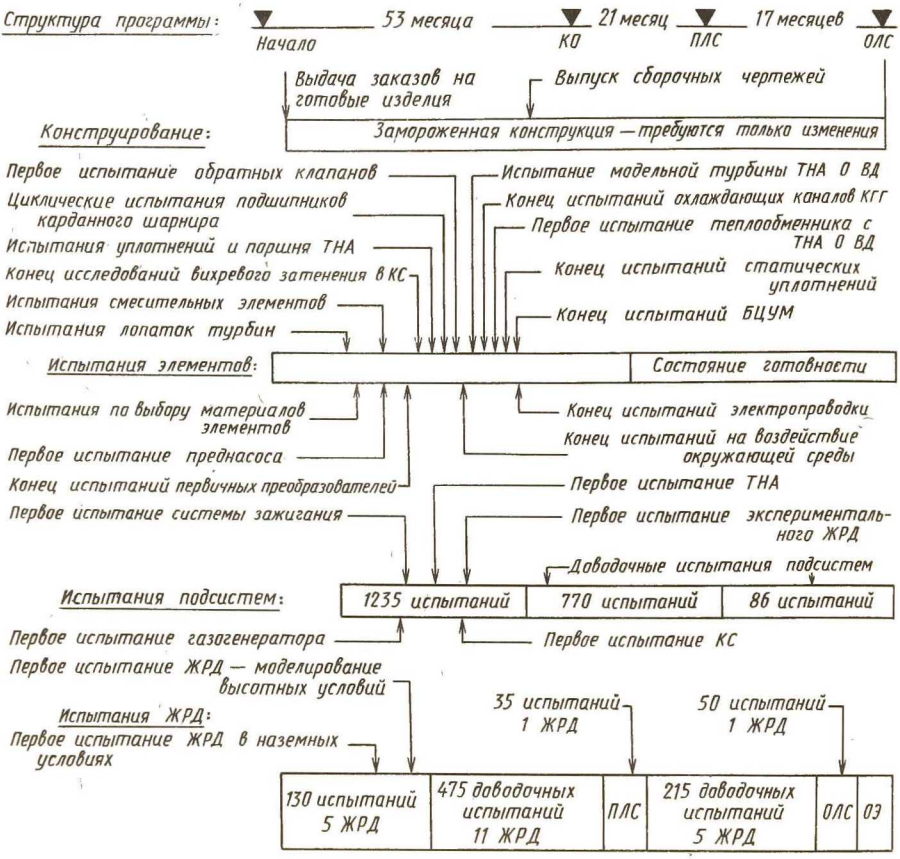


Рис. 1.4. План отработки основного ЖРД американской МТКК "Спейс шаттл":

КО — обзор конструкции критический; ОЛС — сертификация окончательная летная; КГГ — коллектор горячего газа; БЦУМ — машина бортовая цифровая управляющая; ОЭ — обслуживание при эксплуатациях и полетах; ПЛС — сертификация предварительная летная; КС — камера сгорания ЖРД; ВД — давление высокое; О — окислитель

Государственные летные испытания проводят для подтверждения соответствия характеристик и параметров работоспособности ЖРД требованиям ТЗ в реальных условиях его использования и принятия решения о возможности внедрения ЖРД в эксплуатацию.

Чтобы представить трудоемкость и масштабность процесса отработки современного ЖРД, сошлемся на данные по доводке водородно-

кислородного ЖРД тягой 2090 кН американской МТКК "Спейс шаттл". Согласно плану (рис.1.4) весь цикл отработки до момента получения сертификата о готовности к летной эксплуатации должен был составить около восьми лет. Фактически на создание этого ЖРД ушло более 10 лет.

Доводка предусматривала эксперименты по отдельным элементам конструкции, испытание подсистем и ЖРД в сборе. Огневые испытания подсистем включали в себя испытания газогенераторов, камер сгорания и экспериментальных ЖРД, в составе которых объединены предварительно отработанные подсистемы. Характерной особенностью программы отработки являлось также проведение большого числа огневых испытаний на ограниченном числе ЖРД.

1.2.6. Испытания в процессе серийного производства ЖРД

Основные характеристики. К группе эксплуатационных относятся испытания, которые проводят на заводе-изготовителе и при эксплуатации.

В процессе серийного производства целый ряд узлов и агрегатов ЖРД подвергают различного рода контрольным и отладочным испытаниям. В основном это холодные испытания. К ним относятся испытания узлов на герметичность, испытания, при которых оценивают и измеряют гидросопротивления, определяют характеристики насосов и турбин. В принципе они аналогичны соответствующим испытаниям при выполнении ОКР, но их проводят по стандартным упрощенным программам.

Собранные ЖРД подвергают испытаниям для контроля качества их изготовления и сборки, соответствия основных показателей заявленным параметрам, а также проверки их надежности.

После завершения подготовки серийного производства к выпуску нового ЖРД или возобновления проиводства ранее выпускавшегося ЖРД проводят установочные испытания (УИ). Установочным испытаниям подвергают как отдельные агрегаты, так и ЖРД в сборе. Цель установочных испытаний ЖРД – показать, что серийный ЖРД по надежности и своим характеристикам соответствует ТЗ и эталону, прошедшему межведомственные испытания. Проведение установочных испытаний необходимо в связи с тем, что технологический процесс изготовления серийных ЖРД всегда отличается от процесса изготовления их в опытном производстве.

Применяемые методы контроля серийных ЖРД в значительной степени зависят от их назначения и конструктивных особенностей, используемых компонентов топлива и т.д. Основными видами испытаний, применяемых в настоящее время для контроля качества серийных ЖРД, являются: контрольно-технологические (КТИ) и подтверждающие периодические (ППИ) или контрольно-выборочные (КВИ) испытания.

Контрольно-технологические испытания – это огневые испытания, которым подвергают каждый изготовленный ЖРД. Их цель – контроль качества изготовления и сборки конкретного ЖРД, проверка его работоспособности, соответствия его характеристик требованиям, установленным в конструкторской документации, и возможности предъявления этого ЖРД для дальнейших работ (штатной эксплуатации или подтверждающих периодических, контрольно-выборочных, специальных периодических, типовых испытаний). Если ЖРД после контрольно-технологических испытаний разбирают, то его дефектация является дополнительным средством контроля, позволяющим выявить скрытые и неразвившиеся дефекты. По результатам контрольно-технологических испытаний также, если это необходимо, поднастраивают ЖРД на заданный режим работы.

Продолжительность контрольно-технологических испытаний обычно составляет несколько десятков секунд. В процессе этих испытаний ЖРД может работать на нескольких режимах по давлению в камере сгорания и соотношению компонентов топлива. Продолжительность работы на каждом режиме не должна быть меньше времени, потребного для изменения и стабилизации тепловых, вибрационных и других видов нагрузок на элементы ЖРД. Например, время стабилизации параметров ЖРД после запуска составляет примерно 5...20 с. Обычно для обеспечения правильности определения основных параметров на установившихся режимах делают выдержку не менее 10 с.

Число измеряемых параметров при серийных испытаниях существенно меньше, чем при опытно-конструкторских. Обычно ограничиваются измерением лишь тех параметров, которые требуются для определения основных данных ЖРД и диагностирования возможных неисправностей.

ЖРД считается прошедшим контрольно-технологические испытания, если их программа полностью выполнена, подлежащие контролю параметры находятся в пределах установленных допусков, а элементы ЖРД не имеют дефектов, препятствующих его дальнейшей работе.

Подтверждающие периодические испытания имеют целью контроль качества изготовления ЖРД и проверку соответствия его характеристик и параметров работоспособ-

ности требованиям, установленным в ТЗ. Эти испытания проводят через определенный промежуток времени. Контрольно-выборочные испытания преследуют ту же цель, что и подтверждающие периодические испытания, но им подвергают один или несколько ЖРД из определенной партии.

Подтверждающие периодические (контрольно-выборочные) испытания – это длительные испытания ЖРД, проводимые на ресурс или на время, превышающее его, в процессе которых изменяются режимы его работы во всем эксплуатационном диапазоне. Если технология испытания конкретных ЖРД предусматривает проведение контрольно-технологических испытаний, то на подтверждающие периодические (контрольно-выборочные испытания) отбирают ЖРД, предварительно прошедший контрольно-технологические испытания.

По результатам подтверждающих периодических (контрольно-выборочных) испытаний определяют основные параметры ЖРД, а также оценивают их изменение за ресурс. ЖРД, прошедшие подтверждающие периодические (контрольно-выборочные) испытания, подвергают разборке, дефектации, металлургическим исследованиям и другим видам контроля, позволяющим установить их техническое состояние.

Если характеристики ЖРД и состояние его элементов соответствуют ТУ, то серийный завод получает право на отправку остальных ЖРД, изготовленных за отчетный период (ЖРД отчетной партии), заказчику. В противном случае выясняют причину дефекта или несоответствия ТУ; по всем ЖРД партии осуществляют необходимые мероприятия и проводят повторные испытания. Только положительные результаты испытания позволяют снять запрет на отправку ЖРД заказчику.

Методы контроля серийных ЖРД. Комплексная проверка серийных ЖРД чаще всего осуществляется одним из следующих методов:

1. Контрольно-технологические испытания с последующей переборкой + подтверждающие периодические (контрольно-выборочные) испытания.

2. Контрольно-технологические испытания без последующей переборки + подтверждающие периодические (контрольно-выборочные) испытания.

3. Холодные контрольно-технологические испытания + подтверждающие периодические (контрольно-выборочные) испытания.

4. Подтверждающие периодические (контрольно-выборочные) испытания без предшествующих контрольно-технологических.

Первый из перечисленных методов позволяет осуществить полное обследование технического состояния всех деталей путем их осмотра

и применения неразрушающего контроля. При этом могут быть обнаружены скрытые дефекты, которые не выявляются в процессе кратковременного испытания (трещины, недопустимый износ трущихся деталей и т.д.). Недостатком подобного метода контроля является возможность некачественной сборки после контрольно-технологических испытаний. Кроме того, в любом ЖРД имеется значительное число деталей разового пользования (элементы уплотнений, крепежа и т.д.), техническое состояние которых не проверяют при контрольно-технологических испытаниях.

Указанный недостаток устраняют при проведении контрольно-технологических испытаний без последующей переборки. Однако в этом случае предъявляют дополнительные требования к конструкции ЖРД и методам его обработки после испытания – ЖРД должен допускать многократные включения даже в том случае, если он предназначен для одноразового использования. Это требует усложнения элементов системы управления и конструкции уплотнений. Кроме того, в трактах подачи компонентов топлива должны отсутствовать тупиковые полости, в которых могло бы оставаться топливо после окончания испытания. Более сложной становится технология обработки ЖРД после контрольно-технологических испытаний, она должна предусматривать надежное удаление остатков топлива из магистралей и полостей во избежание вредного воздействия их на материалы конструкции при длительном хранении. Отрицательная сторона контрольно-технологических испытаний без переборки заключается также в трудности выявления скрытых дефектов. В связи с этим повышают требования к методам и средствам технического диагностирования при проведении испытаний и последующем обследовании состояния узлов и агрегатов методами неразрушающего контроля.

Некоторые ЖРД подвергают холодным контрольно-технологическим испытаниям без последующей переборки. Основой данного испытания являются холодные проливки, при которых моделируют потоки компонентов топлива в магистралях ЖРД. Для имитации горючего можно использовать, например, воду и спирт, а для имитации окислителя – фреон. В качестве имитатора рабочего тела турбины используют подогретый воздух или инертные газы. Модельные жидкости и газы не должны вступать в химическое взаимодействие с материалами конструкции. Удаление остатков модельных жидкостей из полостей ЖРД не должно вызывать затруднений.

Холодные контрольно-технологические испытания позволяют:

проверить правильность сборки и убедиться в отсутствии инородных тел в магистралях ЖРД;

проконтролировать функционирование и оценить характеристики насосов, турбины, клапанов и элементов системы регулирования;

определить точность настройки ЖРД по соотношению компонентов.

Исключение контакта штатных компонентов топлива с элементами ЖРД является значительным достоинством холодных контрольно-технологических испытаний в случае, когда применяемые компоненты оказывают вредное воздействие на материалы конструкции. Существенный недостаток этих испытаний заключается в отсутствии проверки ЖРД в реальных условиях работы. Подобные испытания применяли на посадочных ЖРД лунной кабины КК "Аполлон".

Подтверждающие периодические (контрольно-выборочные) испытания являются заключительным этапом проверки качества серийных ЖРД в каждом из приведенных ранее методов. В некоторых случаях контрольно-технологические испытания не проводят, а контроль качества продукции осуществляют только подтверждающими периодическими (контрольно-выборочными) испытаниями.

Подобный метод может быть признан целесообразным, когда воздействие компонентов топлива на элементы конструкции при контрольно-технологических испытаниях и последующее длительное хранение ЖРД приводят к снижению его надежности. Но при этом методе период, установленный для проведения подтверждающих периодических испытаний, или размер партии, от которой отбирают ЖРД на контрольно-выборочные испытания, обычно бывают меньшими, чем в случае, когда предусматривается предварительное проведение контрольно-технологических испытаний.

Кроме контрольно-технологических и подтверждающих периодических (контрольно-выборочных) испытаний в процессе серийного производства проводят также специальные периодические (СПИ) и типовые испытания.

Специальные периодические испытания имеют целью периодическое определение соответствия характеристик и гарантийных запасов работоспособности ЖРД уровню, достигнутому при завершении ОКР. Кроме того, с помощью этих испытаний осуществляют контроль стабильности технологического процесса. Специальные периодические испытания проводят в расширенном относительно рабочего диапазоне параметров с целью проверки стабильности производства.

Типовые испытания проводят для выявления влияния различных технологических и конструктивных мероприятий, проводимых по ЖРД, находящемуся в серийном производстве, на его характеристики и работоспособность. Эти испытания проводят обычно один раз в год.

1.2.7. Испытания ЖРД многоразового использования в процессе их эксплуатации

В настоящее время все большее распространение получают многоразовые транспортные космические системы. Принцип многоразовости требует применения в них ЖРД многократного использования, которые необходимо подвергать периодическому контролю. Поэтому для ЖРД многоразового использования разрабатывают методики контроля технического состояния и подготовки к очередному полету, учитывающие особенности конкретной ракетной системы и ЖРД. В основу этих методик закладывают проведение огневых испытаний в межполетный период.

Предусматривают проведение испытаний двух видов:

межполетные контрольно-технологические испытания (МКТИ);

межполетные подтверждающие испытания (МПИ).

Межполетным контрольно-технологическим испытаниям подвергают каждый ЖРД непосредственно после полета или выполнения необходимых восстановительных работ. В результате этих испытаний должна быть получена информация о техническом состоянии ЖРД, позволяющая сделать заключение о его соответствии конструкторской документации. Время работы при межполетном контрольно-технологическом испытании ограничивается временем, необходимым для получения требуемого объема информации, т.е. выработка ресурса ЖРД при проведении этих испытаний должна быть минимальной.

Однако межполетное контрольно-технологическое испытание не гарантирует безаварийную работу многоразовых ракетных систем, эксплуатация которых лишь начинается, поэтому предусматривается проведение межполетных подтверждающих испытаний.

На межполетные подтверждающие испытания отбирают один из партии ЖРД, ранее эксплуатируемых и прошедших межполетные контрольно-технологические испытания. Его подвергают испытаниям при гарантийной наработке. Размер партии устанавливается конструкторской докумен-

тацией. При успешном завершении межполетного подтверждающего испытания дают разрешение на очередное использование ЖРД данной партии по прямому назначению.

По мере накопления статистики летной эксплуатации конкретной МТКС методика межполетного контроля ЖРД может упрощаться.

Испытания ЖРД многоразового использования в межполетный период относятся к группе эксплуатационных.

Контрольные вопросы

1. Каковы особенности испытаний ЖРД?
2. По каким признакам и на какие виды классифицируют испытания ЖРД?
3. Какие испытания проводят в процессе ОКР по созданию новых ЖРД и каковы их цели и особенности?
4. Каким испытаниям подвергают ЖРД в серийном производстве?
5. Какие методы используют для контроля качества серийных ЖРД?
6. Какие испытания проводят при эксплуатации ЖРД многоразового использования для контроля их состояния?

Глава 2

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ МЕТРОЛОГИИ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ, СРЕДСТВАХ И ПОГРЕШНОСТЯХ ИЗМЕРЕНИЯ

2.1.1. Виды измерений

Основным способом получения информации при проведении исследований или контроле качества ЖРД и их элементов является измерение. И з м е р е н и е – это нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. Основное уравнение измерения

$$x = av, \tag{2.1}$$

где x – измеряемая величина, a – единица измерения; v – значение измеряемой величины или результат измерения в принятых единицах измерения.

Таким образом, под результатом измерения подразумевают значение физической величины в принятых единицах, полученное путем измерения.

Для измерения одних и тех же параметров можно использовать различные принципы и методы. Под п р и н ц и п о м и з м е р е н и я понимают совокупность физических явлений, на которых основаны измерения, а под м е т о д о м и з м е р е н и я – совокупность приемов использования принципов и средств измерения.

В практике испытаний ЖРД реализуют прямые, косвенные, совместные и совокупные измерения.

П р я м ы м и называют измерения, при которых искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных. Наибольшее распространение при испытаниях ЖРД и их элементов при прямых измерениях получили следующие методы:

м е т о д с р а в н е н и я с м е р о й – измеряемая величина сравнивается с величиной, воспроизводимой мерой (измерение массы на рычажных весах с уравновешиванием гирями, длин линейкой и т.п.);

м е т о д н е п о с р е д с т в е н н о й о ц е н к и – значение величины определяется непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия (измерение давления пружинным манометром, массы на циферблатных весах и т.д.);

д и ф ф е р е н ц и а л ь н ы й м е т о д – на измерительный прибор воздействует разность измеряемой величины и известной величины, воспроизводимой мерой (измерение разности давлений дифференциальным манометром, разности сил токов логометром и т.д.);

м е т о д с о в п а д е н и й – разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, измеряют, используя совпадения меток шкал или периодических сигналов (измерение частоты с помощью генератора фиксированной или регулируемой частоты);

н у л е в о й м е т о д – результирующий эффект воздействия величин на прибор сравнения доводят до нуля (измерение ЭДС термопары потенциометром и т.п.).

К о с в е н н ы м и называют измерения, при которых искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям. Например, удельный импульс тяги ЖРД определяют по непосредственно измеренным тяге и массовому расходу топлива.

С о в м е с т н ы м и называют одновременные измерения двух или нескольких величин для нахождения зависимости между ними.

С о в о к у п н ы м и называют одновременные измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин находят решением системы уравнений, получаемых при прямых измерениях различных сочетаний величин.

Отличие между совместными и совокупными измерениями состоит в том, что в первом случае для определения искомой величины измеряют несколько других разноименных величин, а во втором – несколько других одноименных величин.

2.1.2. Средства измерения, их структурные элементы

Технические средства, используемые при измерениях и имеющие нормированные метрологические свойства, называются с р е д с т в а м и и з м е р е н и я. К ним относятся:

м е р а, предназначенная для воспроизведения физической величины заданного размера;

измерительный прибор, представляющий собой устройство для выработки сигналов измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем;

измерительная установка, представляющая собой совокупность функционально объединенных средств измерений и вспомогательных устройств, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем, и расположенная в одном месте;

измерительная система, представляющая собой совокупность средств измерений и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и (или) использования в автоматических системах управления.

По виду получаемой информации измерительные приборы делятся на следующие виды:

показывающие, допускающие только отсчитывание показаний;

цифровые, автоматически вырабатывающие дискретные сигналы измерительной информации, показания которых представлены в цифровой форме;

аналоговые, показания которых являются непрерывной функцией изменений измеряемой величины;

регистрирующие, в которых предусмотрена регистрация показаний; последние, в свою очередь, подразделяются на самопишущие, в которых запись показаний производится в форме диаграммы, и печатающие, в которых производится печатание показаний в цифровой форме.

В зависимости от способа получения искомой величины измерительные приборы могут быть:

прямого действия, в которых предусмотрено одно или несколько преобразований сигнала измерительной информации в одном направлении (манометр, амперметр, жидкостный термометр и т.п.);

сравнения, предназначенные для непосредственного сравнения измеряемой величины с величиной, значение которой известно (разноплечные весы, электроизмерительный потенциометр и т.д.);

интегрирующие, в которых подводимая величина подвергается интегрированию по времени или другой независимой переменной (измеритель частоты вращения);

суммирующие, показания которых функционально связаны с суммой двух или нескольких величин, подводимых к ним по различным каналам.

Приборы подразделяют на рабочие, образцовые и эталоны. Рабочие приборы используют для практических измерений, причем их, в свою очередь, делят на лабораторные и технические. Лабораторные приборы являются более точными и их применение позволяет внести поправки измеряемых величин. Технические приборы являются более грубыми, к их показаниям поправок не вносят.

Образцовые измерительные приборы предназначены для проверки и градуировки по ним других средств измерения.

Эталоны используют для воспроизводства и хранения единиц измерения с наивысшей точностью, достижимой на данном уровне развития науки и техники.

Работа измерительных средств основана на различных физических закономерностях, связывающих измеряемую величину и величину, которую воспроизводит используемая мера, функциональной зависимостью. Это дает возможность осуществлять прямое их сравнение.

Измерительные средства в общем случае состоят из ряда структурных элементов, объединенных в измерительную цепь. В каждом отдельном элементе осуществляется одно преобразование измеряемой величины. Наиболее часто используют структурные элементы, имеющие механический и электрический принцип действия. Специфика испытаний ЖРД, при которых измерительные средства могут быть расположены на значительном расстоянии от места измерения и должны обладать высокой точностью, надежностью, малой инерцией, потребовала широкого использования электрических методов измерения неэлектрических величин.

Основными структурными элементами измерительной цепи являются измерительные преобразователи, предназначенные для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателя. Преобразователи в зависимости от назначения подразделяются на первичные, в состав которых включаются чувствительные элементы, находящиеся под непосредственным воздействием измеряемой величины; промежуточные, в которых происходит одно из ряда последовательных преобразований величины; масштабные, предназначенные для измене-

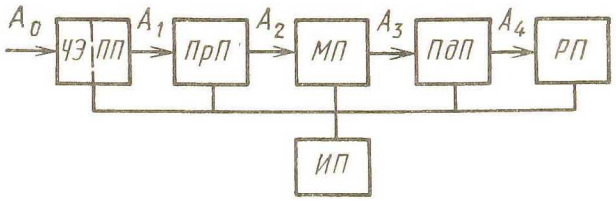


Рис. 2.1. Принципиальная структурная схема измерительной цепи:
ИП – источник питания; A_0 – сигнал входной; $A_1 \ldots A_4$ – сигналы промежуточные; ЧЭ – элемент чувствительный; ПП – преобразователь первичный; ПрП – преобразователь промежуточный; МП – преобразователь масштабный; ПдП – преобразователь передающий; РП – преобразователь регистрирующий

ния величины в заданное число раз; п е р е д а ю щ и е, предназначенные для дистанционной передачи сигнала измерительной информации, и р е г и с т р и р у ю щ и е (РП), предназначенные для регистрации показаний (рис.2.1).

Средства измерения обладают определенными метрологическими характеристиками, которые позволяют судить об их пригодности для измерения в определенном диапазоне с определенной точностью. К метрологическим характеристикам средств измерения относятся д и а п а з о н ы и з м е р е н и й, а к метрологическим характеристикам измерительных преобразователей – д и а п а з о н ы п р е о б р а з о в а н и я. Для установленного диапазона измерения существует функциональная зависимость между сигналами на выходе y и на входе x средств измерения, которая называется с т а т и ч е с к о й х а р а к т е р и с т и к о й и имеет вид

$$y = f(x). \tag{2.2}$$

Важными характеристиками измерительного прибора являются его чувствительность и порог чувствительности.

Ч у в с т в и т е л ь н о с т ь S измерительного прибора – это отношение изменения сигнала на его выходе (например, угол перемещения стрелки) к вызывающему его изменению измеряемой величины:

$$S = \lim_{\Delta x \to 0} \left[\frac{\Delta y}{\Delta x} \right] = \frac{dy}{dx}, \tag{2.3}$$

где Δy – изменение сигнала на выходе; Δx – изменение измеряемой величины.

Чем больше S, тем чувствительнее прибор и тем круче его статическая характеристика. Это означает, что он способен фиксировать относительно малые изменения измеряемой величины. Чувствительность может быть либо постоянной (линейная статическая характеристика), либо зависящей от x. В первом случае прибор имеет линейную шкалу, во втором – нелинейную. Нелинейность шкалы нежелательна.

Порог чувствительности характеризуется наименьшим доступным для регистрации изменением измеряемой величины, вызывающим перемещение указателя. Чем больше чувствительность, тем меньше этот порог.

2.1.3. Погрешности измерений и измерительных приборов

Никакое измерение не может быть выполнено абсолютно точно, оно всегда имеет определенную погрешность, вызванную объективными или субъективными причинами. Погрешности средств измерений и нормы на них являются важнейшими метрологическими характеристиками.

Под точностью измерения понимают качество измерения, отражающее близость его результата к истинному значению измеряемой величины.

Количественная оценка точности измерения обычно выражается указанием погрешности измерения.

Погрешностью измерения называют отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. Чем меньше погрешность измерения, тем выше его точность, и наоборот.

Значение погрешности либо определяют по результатам измерений, либо задают до начала измерения исходя из конкретных требований и принятого критерия целесообразности. В последнем случае должны быть подобраны такие измерительные средства и методы измерений, при которых обеспечивается заданная точность. Учет критерия целесообразности при задании точности измерений необходим, так как излишне высокие требования приводят к удорожанию испытаний.

По характеру появления погрешности измерения принято подразделять на случайные, систематические и грубые.

Случайная погрешность – это составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. Она возникает из-за влияния различных случайных факторов, которые могут меняться от изме-

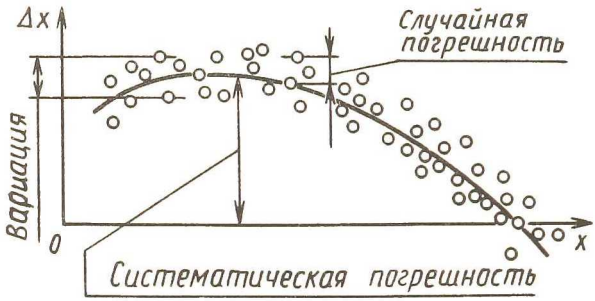


Рис. 2.2. Распределение случайных и систематических погрешностей при многократных испытаниях измерительного прибора

рения к измерению. Поэтому результаты повторных измерений одной и той же величины могут отличаться друг от друга.

Систематическая погрешность – это составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины. Причинами систематических погрешностей могут быть: смещение стрелки или шкалы относительно номинального положения, неточности градуировки шкалы, неточная установка или регулировка прибора, неправильное постоянно повторяющееся положение наблюдателя относительно прибора и пр.

Систематические и случайные погрешности при проведении измерений проявляются, как правило, одновременно. Но их можно отделить друг от друга. Строят зависимость погрешностей, найденных по результатам многократных испытаний прибора, от уровня измеряемой величины вариации (рис.2.2). Затем определяют среднюю линию поля разброса для всего диапазона изменения измеряемой величины. Эта линия является законом изменения систематической погрешности, а отклонения от нее представляют собой случайные погрешности отдельных измерений. Наибольшая разность между повторными показателями измерительного средства при неизменных внешних условиях называется вариацией его показаний.

Систематическая погрешность может быть полностью или частично ликвидирована введением соответствующих поправок при окончательной оценке результата измерения. Случайная погрешность в силу своей природы не может быть устранена введением поправок, но ее возможное значение можно оценить методами теории вероятностей.

Грубая погрешность – это погрешность измерения, существенно превышающая ожидаемую при данных условиях. Причинами грубых погрешностей могут быть ошибочные действия наблюдателя, неисправность прибора или неверная его эксплуатация. Результаты измерения, значительно отличающиеся от остальных, исключают и не подвергают дальнейшему анализу. Грубые погрешности являются опасными при единичных измерениях, когда их трудно обнаружить. При многократных измерениях одной и той же величины их можно выявить путем сопоставления полученных результатов. Для объективной отбраковки грубых погрешностей используют вероятностные критерии.

В зависимости от условий эксплуатации средств измерения их погрешности подразделяют на основные и дополнительные. Основная погрешность – это погрешность средства измерения, используемого в нормальных условиях эксплуатации, пределы которых указаны в его паспорте. Дополнительная погрешность – это погрешность меры вследствие изменения ее действительного значения, вызванного отклонением одной из влияющих величин от нормального значения или выходом за пределы нормальной области значений. Дестабилизирущими факторами могут быть повышенные температура или вибрации в месте установки меры, отклонение напряжения источника питания от заданного и т.д.

При математической обработке результатов измерений различают абсолютную, относительную и приведенную погрешности.

Абсолютной погрешностью измерения называют погрешность, выраженную в единицах измеряемой величины. Она определяется по формуле

$$\Delta x = x_{изм} - x, \qquad (2.4)$$

где $x_{изм}$ и x – соответственно измеренное и истинное значения измеряемой величины.

Так как истинное значение измеряемой величины обычно неизвестно из-за отсутствия идеальных методов измерения, то на практике вместо него используется действительное ее значение. Действительным значением называется значение физической величины, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному значению, что для данной цели может быть использовано вместо него. Очень часто за действительное значение принимают среднее арифметическое ряда результатов наблюдений. Значение абсолютной погрешности, взятое с обратным знаком,

является поправкой к показанию средства измерений. Таким образом, поправка $q = -\Delta x$, а действительное значение измеряемой величины

$$x = x_{изм} + q. \tag{2.5}$$

Под относительной погрешностью понимают отношение абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины. Номинальная относительная погрешность (в процентах)

$$\delta_{ном} = \frac{\Delta x}{x} 100, \tag{2.6}$$

а действительная относительная погрешность (в процентах)

$$\delta_{д} = \frac{\Delta x}{x_{д}} 100, \tag{2.7}$$

где $x_{д}$ – действительное значение измеряемой величины.

Приведенной погрешностью называют отношение погрешности средства измерения к нормируемому значению, в качестве которого чаще всего используют верхний предел измерений или диапазон измерений. Приведенная погрешность (в процентах)

$$\vartheta = \frac{\Delta x}{x_N} 100, \tag{2.8}$$

где x_N – нормируемое значение.

Для оценки качества средства измерения ему присваивают класс точности. В паспортах ранее выпущенных средств измерений была приведена лишь одна метрологическая характеристика – предел допускаемой погрешности, равный максимальной абсолютной погрешности, или наибольшая приведенная погрешность, вычисленная по формуле (2.8), где в качестве x_N используют верхний предел измерений. Наибольшим значением приведенной погрешности ϑ определялся класс точности ряда измерительных приборов. Если, например, ϑ во всех интервалах шкалы не превышала 0,5 % от максимального значения величины, измеряемой средством измерений, то его класс точности принимался равным 0,5 и указывался на его шкале или в паспорте.

Для выпускаемых в настоящее время средств измерения класс точности – это обобщенная характеристика, определяемая

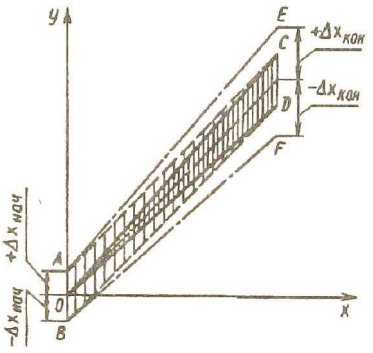


Рис.2.3. Примеры областей погрешностей измерения

пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими средствами средств измерений, влияющими на точность, значения которых устанавливаются в стандартах на отдельные виды средств измерений.

Полная информация о метрологических характеристиках приведена в документации на соответствующее средство измерения. Значение класса точности прибора маркируют на его шкале. При этом используют несколько видов обозначений, в зависимости от характера проявления погрешностей и, в первую очередь, от того, является ли погрешность аддитивной или мультипликативной.

А д д и т и в н о й называют погрешность, постоянную во всем диапазоне измерения, т.е. независящую от текущего значения x. На рис.2.3 границы области появления аддитивной погрешности обозначены линиями AC и BD. Примерами аддитивности погрешности могут служить неточная установка средства измерений на нуль перед измерением, наводка переменной ЭДС на вход устройства и т.п.

М у л ь т и п л и к а т и в н о й называют погрешность, уровень которой возрастает пропорционально увеличению измеряемой величины x. Границами области появления мультипликативной погрешности на рис.2.3 являются линии OC и OD. Причинами возникновения мультипликативных погрешностей могут являться, например, изменения жесткости мембраны манометра или пружины прибора и т.д.

Если погрешности условно приняты чисто мультипликативными, то класс точности обводится кружком. Так, (1,0) означает, что относительная погрешность, определяемая формулой (2.6), составляет 1,0 %.

Если погрешности приняты аддитивными и средства измерений нормируют приведенной погрешностью, определяемой формулой (2.8), то класс точности указывают без каких-либо значков.

На средствах измерений с резко неравномерной шкалой, например на омметрах, класс точности указан в долях от длины шкалы и обозначается в виде $\underline{1,0}$.

При одновременном присутствии как аддитивной, так и мультипликативной погрешностей (на рис.2.3 область, ограниченная линиями AE

и *BF*) погрешность возрастает от значения $\Delta x_{нач}$ в начале шкалы средства измерений до значения $\Delta x_{кон}$ в конце ее. При этом класс точности средства измерений обозначают не одним, а двумя числами, которые записывают через косую черту, например 2,0/1,0. Первая цифра обозначает приведенную погрешность (в процентах) в конце шкалы, вторая – в начале шкалы.

Таким образом, указанный на шкале класс точности средства измерений позволяет приближенно оценить погрешность результатов измерений.

Средства измерений, имеющие несколько диапазонов измерений, могут иметь несколько классов точности.

С течением времени погрешности средств измерений могут увеличиваться вследствие износа деталей, изменения жесткости пружин, увеличения трения в подвижных частях и т.п. В связи с этим их периодически должны подвергать п о в е р к е. Порядок и сроки проведения поверок регламентирует ГОСТ.

2.2. ПРИЧИНЫ, ВЫЗЫВАЮЩИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Выяснение причин, приводящих к погрешностям измерений, является важным этапом подготовки и проведения экспериментальных исследований. Если эти причины ясны, проводят работы по полному или частичному устранению тех или иных погрешностей. В ряде случаев погрешности могут быть уменьшены путем применения более подходящих или более точных средств измерений или методов исследования.

Все погрешности измерений могут быть подразделены на две группы:объективные и субъективные. О б ъ е к т и в н ы е п о г р е ш н о с т и возникают из-за несовершенства методов или средств измерений, их дефектов, инерции, влияния дестабилизирующих факторов.

Причиной возникновения с у б ъ е к т и в н ы х п о г р е ш н о с т е й являются физиологические особенности наблюдателя и качество его работы.

Объективные погрешности подразделяют на статические и динамические. С т а т и ч е с к и е п о г р е ш н о с т и – погрешности средств измерений, используемых для измерения постоянных величин.

Динамические погрешности – разность между погрешностью средства измерений в динамическом режиме и его статической погрешностью, соответствующей значению величины в данный момент.

К статическим относятся методические, инструментальные погрешности и погрешности из-за влияния внешних условий.

Погрешности метода измерения связаны с несовершенством метода измерения. Например, температура рабочего тела на выходе из газогенератора ЖРД, работающего на двухкомпонентном топливе, может быть определена либо путем непосредственного измерения термопарой, либо по соотношению расходов компонентов топлива в газогенераторе. Первый метод может оказаться менее точным из-за имеющейся обычно неравномерности температурного поля. Погрешности метода измерения могут возникать также при использовании упрощенных формул для определения измеряемой величины.

Инструментальные погрешности вносят средства измерений. Причинами их могут быть отклонения характеристик материалов, из которых изготовлены элементы средства измерения, от номинальных, неточности изготовления, сборки и регулировки средств измерений, их конструктивные недостатки. Причинами погрешностей могут быть, в частности, неточности шкалы, наличие трения между отдельными деталями и зазоров в опорах и подвижных соединениях, неуравновешенность подвижной системы прибора, гистерезис у механических приборов с упругими чувствительными элементами и у электрических приборов с ферромагнитным магнитопроводом.

Погрешности из-за влияния внешних условий связаны с воздействием физических величин, которые не измеряются данным средством измерений, но оказывают влияние на результаты измерения. К подобным величинам относятся: давление и температура окружающей среды, от которых зависят свойства материалов (электрическое сопротивление, модуль упругости) и линейные размеры деталей; влажность и ионизирующее излучение, приводящие к утечкам электричества в электроизмерительных приборах; внешние электрические и магнитные поля, влияющие на работу электрических приборов; вибрации и т.п. Для уменьшения этих погрешностей оптимизируют схемы средств измерений, применяют специальные компенсаторы, осуществляют экранирование и герметизацию. Кроме того, строго соблюдают условия эксплуатации, оговоренные в пас-

порте средства измерений, что позволяет избежать дополнительных погрешностей. Так, при стендовых испытаниях ЖРД широко применяют средства измерений, первичные преобразователи которых охлаждают водой.

Динамические погрешности обусловлены инерционными свойствами средства измерений. Они возникают при измерении быстроменяющихся физических величин. Динамическая погрешность равна разности между погрешностью средства измерений в динамическом режиме и его статической погрешностью, соответствующей значению величины в данный момент. Эта погрешность проявляется в виде:

длительных затухающих колебаний подвижных элементов средств измерений при переходе от измерения одного значения физической величины к другому;

завышения или занижения показаний средств измерений (амплитудная погрешность) и отставания по времени в регистрации измеряемого процесса (фазовая погрешность).

Субъективные погрешности вносит наблюдатель, и они связаны с особенностью его органов чувств, утомляемостью, внимательностью, которые проявляются в быстроте реакции на сигналы при исполнении команд, связанных с началом и окончанием измерения, промахах при измерении, записи и т.п. Время реакции человека на раздражение световым сигналом средней силы света составляет 0,15...0,225 с, а время реакции на звуковой сигнал – 0,082...0,195 с.

Субъективные погрешности зависят также от индивидуальной оценки показаний по отсчетному устройству и от положения наблюдателя относительно средства измерений в момент измерения. Поскольку стрелка указателя расположена на некотором расстоянии от поверхности шкалы и наблюдатель ее видит в направлении, неперпендикулярном поверхности шкалы, возможно появление дополнительной погрешности от параллакса. Для уменьшения влияния параллакса стрелку смещают ближе к шкале, которую выполняют зеркальной и т.п.

Субъективные погрешности могут быть устранены путем применения автоматической регистрации показаний приборов, хотя и здесь возможны погрешности, связанные с неправильным считыванием результатов наблюдений.

2.3. ЗАКОН НОРМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ. ПОНЯТИЯ О СРЕДНЕМ КВАДРАТИЧЕСКОМ ОТКЛОНЕНИИ, ПРЕДЕЛЬНОЙ И ВЕРОЯТНОЙ ПОГРЕШНОСТЯХ ИЗМЕРЕНИЙ

В задачу каждого экспериментального исследования помимо проведения непосредственных измерений входит также оценка точности полученных результатов. При измерениях физических величин в тех случаях, когда основную роль играют случайные погрешности, образующиеся в результате одновременного действия ряда причин, оценить точность измерений можно только вероятностными методами. Однако для этого должны быть известны закон распределения случайных погрешностей и параметры, характеризующие это распределение.

Под законом распределения случайной погрешности понимают соотношение, устанавливающее связь между возможными значениями случайной погрешности и соответствующими им вероятностями. Он может быть определен следующими способами:

1. Путем расчета композиции законов распределения частных погрешностей. Но обычно ни причины, вызывающие частные погрешности, ни законы их распределения не известны.

2. Опытным путем по результатам большого числа измерений (более 50). По этим результатам строят гистограмму, выполняя ступенчатую аппроксимацию функции распределения, и по ней определяют закон распределения и характеризующие его параметры. В практических условиях подобная возможность также не всегда имеется.

3. Путем предположения о виде закона распределения на основании общих соображений о характере погрешностей и специфике источников их возникновения.

В большинстве практических случаев принимают гипотезу о нормальном характере закона распределения случайных погрешностей. Это соответствует предельной теореме теории вероятностей, согласно которой при числе частных погрешностей, большем 5, и отсутствии среди них выделяющейся по порядку величины погрешности, погрешность функции распределена нормально при любых законах распределения частных погрешностей.

Формула Гаусса, описывающая закон нормального распределения, была выведена на основании двух аксиом:

при большом числе наблюдений равные по абсолютной величине, но разные по знаку погрешности появляются одинаково часто;

большие (по абсолютной величине) погрешности встречаются реже, чем малые, т.е. вероятность появления погрешности уменьшается с увеличением ее значения.

Формула Гаусса для плотности вероятности $p(x)$ появления величины x имеет вид

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\bar{x})^2/(2\sigma^2)}, \qquad (2.9)$$

где $e = 2{,}718\ldots$ – основание натурального логарифма; $\bar{x}$ – математическое ожидание (центр группирования величины x); σ^2 – дисперсия.

Дисперсия характеризует быстроту уменьшения вероятности появления погрешности с увеличением ее значения. Чем больше σ, тем плавнее кривая распределения (рис.2.4) и тем менее точен эксперимент. Величина σ называется *средним квадритическим отклонением* случайной величины x. Геометрически она представляет собой расстояние от оси симметрии кривой распределения до перегиба.

Кривая нормального распределения может быть построена как для распределения отдельных измерений x_i, так и для распределения погрешностей $x_i - \bar{x}$. В последнем случае математическое ожидание равно нулю.

Следует отметить, что кривая распределения характеризует не данную конкретную серию наблюдений, а гипотетическую совокупность бесконечного числа измерений данной величины данным методом. Все множество возможных измерений x_i или возможных значений погрешностей $x_i - \bar{x}$ называется *генеральной совокупностью*, а некоторая часть этих результатов – *выборкой*. Число результатов наблюдений, входящих в выборку, называют ее объемом.

На практике чаще возникает необходимость определения не вероятности появления какой-либо определенной погрешности $\Delta x = x - \bar{x}$, а вероятности попадания погрешности в интервал от $+\Delta x$ до $-\Delta x$. Если всю площадь под кривой распределения принять равной единице, то вероятность P появления погрешности в интервале от $+\Delta x$ до $-\Delta x$ будет равна площади под кривой распределения, ограниченной этим интервалом (рис.2.5).

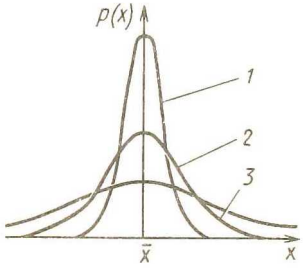


Рис. 2.4. Кривые нормального распределения при различной дисперсии:
1, 2, 3 — соответственно σ= 1, 2, 3

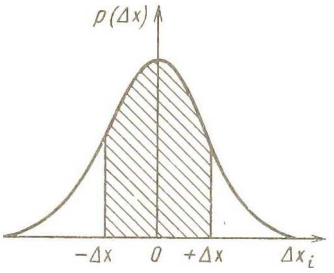


Рис. 2.5. Распределение плотности вероятности появления погрешности в интервале от $-\Delta x$ до $+\Delta x$

Таким образом, случайная погрешность измерения может быть охарактеризована вероятностью нахождения результата эксперимента в интервале от $+\Delta x$ до $-\Delta x$.

Числовой характеристикой точности определения измеряемой величины может служить предельная погрешность Δ. Под предельной погрешностью (доверительным интервалом) понимают максимальное по абсолютному значению отклонение случайной величины от ее среднего значения, причем вероятностью выхода погрешности за пределы $\pm\Delta$ для данной задачи пренебрегают. Доверительной вероятностью предельного отклонения называют вероятность, с которой модуль погрешности $(x_i - \bar{x})$ будет меньше предельной.

Таким образом, оценка точности измерений характеризуется доверительным интервалом, который с определенной доверительной вероятностью включает случайное отклонение результата измерений. Если через γ обозначить доверительную вероятность, т.е. вероятность того, что результат измерений отличается от действительного значения на величину, не большую чем Δ, то можно записать

$$P(\bar{x} - \Delta < x < \bar{x} + \Delta) = \gamma \qquad (2.10)$$

или

$$P(-\Delta < x - \bar{x} < +\Delta) = \gamma.$$

Доверительную вероятность P иногда называют коэффициентом надежности. Интервал значений от $-\Delta$ до $+\Delta$ называют доверительным ин-

тервалом. Величина доверительного интервала равна удвоенному значению предельной погрешности, т.е. 2Δ.

Таким образом, для того, чтобы ***характеризовать случайную погрешность, необходимо задать два числа – значение самой погрешности (или доверительный интервал) и доверительную вероятность (или надежность оценки).***

Выбор доверительной вероятности является в известной мере произвольным и связан, в первую очередь, со степенью ответственности испытаний. Более высокая доверительная вероятность, требуемая при ответственных измерениях, означает, что для получения той же погрешности Δ следует измерять с большей точностью, что достигается либо применением более совершенных средств и методов измерений, либо многократным повторением измерений. При обычных измерениях ограничиваются доверительной вероятностью 0,9 или 0,95. При особо ответственных измерениях доверительную вероятность можно задавать в пределах 0,997...0,999.

В практике экспериментальных исследований при оценке точности результатов измерений повсеместно применяют среднее квадратическое отклонение σ случайной величины, равное корню квадратному из дисперсии (с положительным знаком). Оно так же, как и дисперсия, характеризует диапазон рассеивания случайной величины. Чем больше диапазон рассеивания результатов наблюдений, тем больше значение среднего квадратического отклонения и тем меньше точность измерений.

Удобство применения среднего квадратического отклонения в качестве основного численного выражения погрешности объясняется тем, что ему соответствует (при нормальном законе распределения) вполне определенная доверительная вероятность, равная 0,68. Удвоенному среднему квадратическому отклонению 2σ соответствует доверительная вероятность 0,95, а при $\Delta = 3\sigma$ – доверительная вероятность 0,9973. Таким образом, если предельная погрешность задана через среднее квадратическое отклонение σ, т.е. если использована зависимость

$$\Delta = t_{н} \sigma, \qquad (2.11)$$

можно сразу же оценить доверительную вероятность ее появления, воспользовавшись формулой Гаусса. Здесь $t_{н}$ – квантильный множитель нормального распределения.

Имеется следующая зависимость между значениями погрешности $\Delta = t_н \sigma$ и доверительной вероятностью:

Предельная погрешность Δ	$0,5\sigma$	$0,6745\sigma$	σ
Доверительная вероятность γ	0,3829	0,5	0,6827
Предельная погрешность Δ	2σ	3σ	4σ
Доверительная вероятность γ	0,9545	0,9973	0,9999

Закон распределения случайной величины и основные его характеристики – математическое ожидание $\bar{x}$ и дисперсия σ^2 могут быть определены по экспериментальным данным.

Для этой цели существуют стандартные методики, которыми предусматривается следующая последовательность действия:

1. По опытным данным строят эмпирическую кривую распределения (гистограмму).

2. Определяют параметры эмпирического распределения:
математическое ожидание

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}, \qquad (2.12)$$

где n – число измерений;
среднее квадратическое отклонение при числе измерений $n \to \infty$

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}. \qquad (2.13)$$

На практике обычно число измерений ограничено, а применение формулы (2.13) целесообразно лишь при $n > 60$. Меньшее число измерений – меньшая выборка не позволяет с необходимой точностью определить закон распределения, а также значения математического ожидания и среднего квадратического отклонения. Они определяются только приближенно и называются оценками или статистическими (эмпирическими) значениями соответствующих величин. Чтобы указать на статистический характер среднего

квадратического отклонения, его обычно обозначают через S и при $n < 60$ формулу (2.13) заменяют на выражение

$$S = \pm\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}\,. \qquad (2.14)$$

Введение в формулу (2.14) величины $1/(n-1)$ вместо $1/n$ позволяет повысить точность определения среднего квадратического отклонения . Обоснованность применения формулы (2.14) при небольших выборках доказывается в курсах теории вероятностей. Естественно, что при $n \to \infty$ величина $S \to \sigma$.

3. Выдвигают одну или несколько гипотез о законе распределения случайной величины исходя из внешнего вида экспериментальной кривой или на основании имеющейся априорной информации.

4. Эмпирическую кривую выравнивают по одной или последовательно по нескольким принятым теоретическим кривым.

5. Сравнивают по одному из критериев согласия эмпирическую и теоретическую кривые. Рекомендуется использование для этой цели критерия согласия Пирсона χ^2 или критерия Колмогорова – Смирнова λ.

6. Выбирают функцию, дающую наилучшее согласование.

Следует отметить, что для определения закона распределения случайной величины по экспериментальным данным требуется достаточно большой объем опытных данных (теоретически $n \to \infty$), а при ограниченности его использование критериев согласия позволяет лишь установить, не противоречит ли конкретная выборка гипотезе о принятом законе распределения. В соответствии с ГОСТ 8.207-76 при числе наблюдений $n \leqslant 15$ принадлежность их к нормальному распределению вообще не может быть проверена экспериментально, и поэтому нахождение доверительных границ случайных погрешностей по методике для нормального распределения возможно лишь в случае, если заранее известно, что данная серия наблюдений подчиняется нормальному закону.

Среднее квадратическое отклонение служит критерием оценки точности измерений, но кроме него для этой же цели можно использовать и другие показатели, однозначно с ним связанные, например в е р о я т н у ю п о г р е ш н о с т ь ρ, которая делит все случайные погрешности n измерений на две равные по числу погрешностей части (доверительная вероятность 0,5):

$$\rho = 0{,}6745\sigma \approx \frac{2}{3}\sigma. \qquad (2.15)$$

Приведенные зависимости позволяют определить ту или иную погрешность единичного измерения группы наблюдений. Однако в тех случаях, когда производят серию измерений, чаще всего за наиболее вероятное значение определяемой величины принимают среднее арифметическое измеренных значений. В этом случае возникает вопрос об оценке точности этой величины, т.е. о значении погрешности среднего арифметического группы результатов измерения.

Формула для определения погрешности среднего арифметического значения может быть получена на основании закона сложения случайных погрешностей. В соответствии с этим законом дисперсия измеряемой величины z, являющейся суммой двух величин x и y (или более), результаты измерений которых независимы, равна сумме дисперсий этих величин, т.е.

$$\sigma_z^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2. \tag{2.16}$$

Соответственно среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_z = \pm \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}. \tag{2.17}$$

Если среднее арифметическое значение $\bar{x}$ получено по результатам отдельных измерений $x_1, x_2, \ldots, x_n$, то

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i = \frac{x_1}{n} + \frac{x_2}{n} + \ldots + \frac{x_n}{n}.$$

Каждый из единичных результатов измерений характеризуется одной и той же дисперсией σ^2. Поэтому в соответствии с формулой (2.16) дисперсия среднего арифметического значения определится формулой

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \sigma^2/n^2 + \sigma^2/n^2 + \ldots + \sigma^2/n^2 = n\sigma^2/n^2 = \sigma^2/n$$

или

$$\sigma_{\bar{x}} = \pm\sigma/\sqrt{n}. \tag{2.18}$$

Аналогично

$$S_{\bar{x}} = \pm \frac{S}{\sqrt{n}} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}. \tag{2.19}$$

Таким образом, среднее квадратическое отклонение среднего арифметического равно среднему квадратическому отклонению результата единичного измерения, деленному на корень квадратный из числа измерений. Из этого положения вытекает очень важный вывод о возрастании точности результата при увеличении числа измерений в случае, когда определяющей является случайная погрешность. Так, если вместо одного производят четыре измерения, то точность повышается в два раза, при девяти измерениях – в три раза и т.д. Необходимо отметить, что с дальнейшим увеличением числа измерений имеет место постепенное ослабление их влияния на точность.

В практической работе важно разграничивать области применения среднего квадратического отклонения результата единичного измерения и среднего квадратического отклонения среднего арифметического значения. Первое применяют, когда требуется характеризовать средство или метод измерений. Зная σ, можно выбрать число измерений, которое обеспечивает необходимую точность. Если же характеризуют точность результатов проведенного исследования, то следует использовать среднее квадратическое отклонение среднего арифметического значения $\sigma_{\bar{x}}$, так как им оценивают точность, полученную по сумме результатов всех произведенных измерений.

Вероятная погрешность среднего арифметического значения

$$\rho_{\bar{x}} = \rho/\sqrt{n}. \qquad (2.20)$$

Полученные зависимости и значения доверительной вероятности справедливы лишь при нормальном законе распределения случайных погрешностей. Однако на практике закон распределения не всегда бывает известен, а иногда он заведомо отличается от нормального. Отклонение от нормального закона возникает при наличии преобладающей погрешности, которая и определяет характер распределения.

2.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОВЕРИТЕЛЬНОГО ИНТЕРВАЛА И ДОВЕРИТЕЛЬНОЙ ВЕРОЯТНОСТИ ПРИ МАЛОМ ЧИСЛЕ ИЗМЕРЕНИЙ

В предыдущем подразделе показано, как определяют доверительную вероятность для любого доверительного интервала, если известно среднее квадратическое отклонение σ. Однако значение σ может быть точно определено только при большом числе измерений, что в реальных условиях не всегда возможно. Обычно по сравнительно небольшому

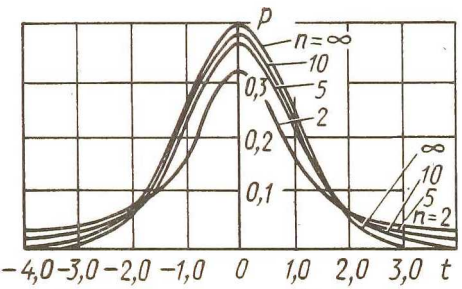


Рис. 2.6. Кривые распределения Стьюдента для различных значений n и нормального закона ($n = \infty$)

числу n, определяемому из формулы (2.14), находят приближенные – эмпирические или статистические значения среднего квадратического S и других параметров. Надежность такой оценки будет тем меньше, чем меньше число измерений. Доверительному интервалу, выраженному через среднее квадратическое отклонение S, фактически будет соответствовать меньшая доверительная вероятность по сравнению с определяемой для нормального закона распределения.

Задачу определения доверительной вероятности при небольшом числе измерений решил английский математик В.Госсет, публиковавший свои работы под псевдонимом Стьюдент. Он показал, что величина $t = \frac{\bar{x} - x_i}{S/\sqrt{n}}$, названная коэффициентом Стьюдента, подчиняется закону, называемому распределением Стьюдента, плотность вероятностей которого выражается формулой

$$p(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{\vartheta+1}{2}\right)}{\sqrt{\vartheta\pi}\cdot\Gamma\left(\frac{\vartheta}{2}\right)\left(1+\frac{x^2}{\vartheta}\right)^{(\vartheta+1)/2}}, \qquad (2.21)$$

где $\Gamma(z)$ – гамма-функция; ϑ – число степеней свободы, зависящее от числа n усредняемых отсчетов, обычно $\vartheta = n - 1$.

Распределение Стьюдента (рис.2.6) отличается от нормального при малом числе измерений ($n < 20$) и переходит в нормальное при $n \to \infty$, т.е. при $n \to \infty$ $t \to t_н$.

Используя коэффициенты Стьюдента, равенство (2.10) можно представить в виде

$$P\left[\bar{x} - t\frac{S}{\sqrt{n}} < x < \bar{x} + t\frac{S}{\sqrt{n}}\right] = \gamma. \qquad (2.22)$$

Таблица 2.1

n	γ			
	0,9	0,95	0,99	0,999
2	6,31	12,71	63,66	636,62
5	2,13	2,78	4,60	8,61
10	1,83	2,26	3,25	4,78

Формула (2.22) позволяет оценить доверительную вероятность при выбранном доверительном интервале в случае малого числа измерений.

Результаты расчетов по распределению Стьюдента приводят в виде таблиц, прилагаемых к пособиям по теории вероятностей и математической статистике. В них для различных значений доверительной вероятности γ и числа измерений n приведены значения коэффициента Стьюдента t (табл.2.1).

При использовании распределения Стьюдента имеет место следующий порядок работы. Если заданы предельная погрешность Δ, то по значению $t = \dfrac{\Delta}{S/\sqrt{n}}$, числу измерений n по таблицам можно определить доверительную вероятность γ и, наоборот, при заданных γ и n можно найти коэффициент t и границы искомого доверительного интервала, которые будут равны $-tS/\sqrt{n}$ и $tS/\sqrt{n}$.

2.5. ПОГРЕШНОСТИ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Большинство параметров, характеризующих работу ЖРД, определяют косвенными методами с использованием результатов нескольких прямых измерений, т.е. в общем случае числовое значение определяемой физической величины является функцией нескольких независимых переменных:

$$y = f(x_1, x_2, \ldots x_n).$$

Например, косвенным путем определяют такие важные характеристики ЖРД, как удельный импульс тяги I_y и расходный комплекс камеры β.

Для определения погрешностей функции (результата косвенных измерений) по погрешностям аргументов (результатам прямых измерений) применяют аппарат дифференциального исчисления. Это правомерно, так как абсолютные погрешности измеренных величин всегда достаточно малы по сравнению с самими величинами. Абсолютные погрешности прямых измерений условно рассматривают как бесконечно малые приращения аргументов, взятые со знаком плюс или минус, а абсолютные погрешности функции – как бесконечно малые ее приращения, вызванные бесконечно малыми приращениями аргументов.

Для функции одного независимого переменного $y = f(x)$ связь между погрешностями функции и аргумента можно представить в виде

$$y \pm dy = f(x \pm dx). \tag{2.23}$$

Используя формулу Тейлора, получаем

$$y + dy = f(x) \pm dxf'(x) \pm$$

$$\pm \frac{(dx)^2}{1 \cdot 2} f''(x) \pm \frac{(dx)^3}{1 \cdot 2 \cdot 3} f'''(x) \pm \ldots \tag{2.24}$$

Учитывая, что произведения малых величин являются малыми величинами более высоких порядков и поэтому могут быть отброшены, а также принимая во внимание равенство $y = f(x)$, получаем

$$dy = \pm dxf'(x) \tag{2.25}$$

или

$$\Delta y = \pm \Delta x f'(x),$$

где Δy – погрешность функции; Δx – погрешность аргумента.

Следовательно, абсолютная погрешность функции одного независимого переменного равна произведению абсолютной погрешности аргумента и производной этой функции.

Относительная погрешность может быть найдена путем деления обеих частей уравнения (2.25) на y:

$$\Delta y/y = \pm \Delta x f'(x)/y \tag{2.26}$$

или

$$\delta y = \frac{dy}{y} = \pm \frac{dx \dfrac{dy}{dx}}{f(x)} = \pm \frac{df(x)}{f(x)} = \pm d\ln f(x), \tag{2.27}$$

т.е. относительная погрешность функции одного независимого переменного равна дифференциалу натурального логарифма этой функции.

Аналогичным путем могут быть получены зависимости для определения абсолютных и относительных погрешностей функций двух или нескольких переменных. Но при решении конкретной задачи об определении значения погрешности функции необходимо знать знаки абсолютных погрешностей аргументов, которые на практике обычно не известны. Принятие предположения об одинаковости знаков всех погрешностей аргументов при определении предельной погрешности приведет к завышению ее значения. Более обоснованной будет оценка предельной погрешности результата косвенного измерения по значениям вероятных погрешностей. Поэтому рассмотрим метод нахождения погрешности функции нескольких переменных на примере определения ее среднего квадратического отклонения.

Установим зависимость между вероятными погрешностями прямых измерений и полученными с их помощью результатами косвенных измерений. Пусть величину y определяют косвенным путем по m величинам x_i, причем каждое x_i регистрируют n раз. По-прежнему будем считать бесконечно малые приращения величин x_i и y их погрешностями:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \ldots, x_m); \qquad (2.28)$$

$$y \pm dy = f(x_1 \pm dx_1, x_2 \pm dx_2, \ldots, x_m \pm dx_m).$$

Применим формулу Тейлора для каждого из n измерений. Отбросив бесконечно малые величины высших порядков, можно записать

$$y \pm dy_i = f(x_1, x_2, \ldots, x_m) \pm$$

$$\pm \frac{\partial f(x_1, x_2, \ldots, x_m)}{\partial x_1} dx_{1i} \pm$$

$$\pm \frac{\partial f(x_1, x_2, \ldots, x_m)}{\partial x_2} dx_{2i} \pm \ldots \pm$$

$$\pm \frac{\partial f(x_1, x_2, \ldots, x_m)}{\partial x_m} dx_{mi}.$$

Заменим бесконечно малые приращения отклонениями каждого результата измерения от среднего арифметического и воспользуемся равенством (2.26):

$$\Delta y_1 = \pm \frac{\partial f(x_1, x_2, \ldots, x_m)}{\partial x_1} (\Delta x_1)_1 \pm$$

$$\pm \frac{\partial f(x_1, x_2, \ldots, x_m)}{\partial x_2} (\Delta x_2)_1 \pm \ldots \pm$$

$$\pm \frac{\partial f(x_1, x_2, \ldots, x_m)}{\partial x_m} (\Delta x_m)_1;$$

$$\Delta y_i = \pm \frac{\partial f(x_1, x_2, \ldots, x_m)}{\partial x_1} (\Delta x_1)_i \pm$$

$$\pm \frac{\partial f(x_1, x_2, \ldots, x_m)}{\partial x_2} (\Delta x_2)_i \pm \ldots \pm \qquad (2.29)$$

$$\pm \frac{\partial f(x_1, x_2, \ldots, x_m)}{\partial x_m} (\Delta x_m)_i;$$

$$\Delta y_n = \pm \frac{\partial f(x_1, x_2, \ldots, x_m)}{\partial x_1} (\Delta x_1)_n \pm$$

$$\pm \frac{\partial f(x_1, x_2, \ldots, x_m)}{\partial x_2} (\Delta x_2)_n \pm \ldots \pm$$

$$\pm \frac{\partial f(x_1, x_2, \ldots, x_m)}{\partial x_m} (\Delta x_m)_n.$$

Возведем все n уравнений (2.29) в квадрат и сложим. При сложении отбросим суммы произведений типа $\sum_{i=1}^{n} (\Delta x_k \Delta x_l)_i$, стремящиеся к нулю при увеличении n, так как знаки плюс и минус произведений $(\Delta x_k \Delta x_l)_i$ равновероятны. В результате получим

$$\sum_{i=1}^{n} (\Delta y)_i^2 = \left[\frac{\partial y}{\partial x_1}\right]^2 \sum_{i=1}^{n} (\Delta x_1)_i^2 +$$

$$+ \left[\frac{\partial y}{\partial x_2}\right]^2 \sum_{i=1}^{n} (\Delta x_2)_i^2 + \ldots + \left[\frac{\partial y}{\partial x_m}\right]^2 \sum_{i=1}^{n} (\Delta x_m)_i^2.$$

Разделим обе части уравнения на $n - 1$. Частное от деления суммы квадратов погрешностей на $n - 1$ есть квадрат среднего квадратического отклонения. Следовательно, окончательная связь между средними квадратическими отклонениями результатов прямых измерений S_{x_1}, S_{x_2}, ..., S_{x_m} и определенным по их значениям средним квадратическим отклонением результатов косвенных измерений S_y запишется в виде

$$S_y = \pm \sqrt{\left[\frac{\partial y}{\partial x_1}\right]^2 S_{x_1}^2 + \left[\frac{\partial y}{\partial x_2}\right]^2 S_{x_2}^2 + \ldots + \left[\frac{\partial y}{\partial x_m}\right]^2 S_{x_m}^2} =$$

$$= \pm \sqrt{\sum_{i=1}^{m} \left[\frac{\partial y}{\partial x_i}\right]^2 S_{x_i}^2}. \qquad (2.30)$$

Равенство (2.30) сохраняется также для вероятной погрешности измерения, которая однозначно связана со средним квадратическим отклонением. Когда расчетная формула удобна для логарифмирования, можно значительно упростить процесс вычисления, применив метод логарифмического дифференцирования. Упрощение обеспечивает переход к относительным погрешностям и использование зависимости

$$d \ln x = \frac{dx}{x}.$$

Расчет выполняют в следующей последовательности:

1. Логарифмируют функцию.
2. Дифференцируют функцию.
3. Объединяют члены с одинаковыми дифференциалами, так как одна и та же погрешность не может иметь одновременно разные знаки.

4. Каждый член полученного выражения возводят в квадрат.

5. Извлекают квадратный корень из данной зависимости, который является относительной погрешностью функции.

6. Относительную погрешность умножают на значение функции, в результате получают ее абсолютную погрешность.

Пример. Требуется вычислить среднее квадратическое отклонение при определении коэффициента быстроходности центробежного насоса ЖРД.

Коэффициент быстроходности n_s определяют из выражения

$$n_s \quad 193,3\omega \sqrt{\dot{V}} / H^{3/4}$$

по измеренной частоте вращения ω, подаче $\dot{V}$, эквивалентной объемному расходу через двигатель, и напору насоса H.

Применим метод логарифмического дифференцирования:

$$\ln n_s = \ln 193,3 + \ln \omega + 0,5 \ln \dot{V} - 0,75 \ln H;$$

$$\frac{dn_s}{n_s} = \frac{d\omega}{\omega} + 0,5 \frac{d\dot{V}}{\dot{V}} - 0,75 \frac{dH}{H};$$

$$\left[\frac{dn_s}{n_s} \right]^2 \quad \left(\frac{d\omega}{\omega} \right]^2 + \left[0,5 \frac{d\dot{V}}{\dot{V}} \right]^2 + \left[- 0,75 \frac{dH}{H} \right]^2;$$

$$\frac{dn_s}{n_s} = \frac{S_{n_s}}{n_s} =$$

$$= \pm \sqrt{\left[\frac{S_\omega}{\omega} \right]^2 + \left[0,5 \frac{S_{\dot{V}}}{\dot{V}} \right]^2 + \left[-0,75 \frac{S_H}{H} \right]^2};$$

$$\delta n_{s\sigma} \quad \pm \sqrt{\delta^2_{\omega_\tau} + 0;25\delta^2_{\dot{V}\sigma} + 0,56\delta^2_{H\sigma}}.$$

где S_{n_s}, S_ω, $S_{\dot{V}}$, S_H – средние квадратические отклонения соответственно коэффициента быстроходности, частоты вращения, подачи, напо-

ра; $\delta n_{s\sigma}$, $\delta_{\omega\sigma}$, $\delta_{\dot{V}\sigma}$, $\delta_{H\sigma}$ — относительные средние квадратические отклонения результатов измерений соответственно коэффициента быстроходности, частоты вращения, подачи и напора насоса.

Абсолютное значение среднего квадратического отклонения коэффициента быстроходности

$$S_{n_s} = \delta n_{s\sigma} n_s .$$

При оценке предельной погрешности результата косвенного измерения можно воспользоваться методом с применением критерия Стьюдента. Для заданной надежности (доверительной вероятности) значение предельной погрешности определяют по формуле

$$\Delta = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^{m} \left[\frac{\partial y}{\partial x_i} \right]^2 t^2 S_{x_i}^2} \quad . \qquad (2.31)$$

Здесь предполагают, что аргументы распределены по нормальному закону и измеряются одинаковое число раз.

На практике могут возникать две задачи, связанные с вычислением предельных погрешностей.

Прямая задача заключается в определении погрешности функции по известным погрешностям аргументов и виду функциональной зависимости. Она поддается решению, если функция является непрерывной и логарифмируемой. Решением прямой задачи можно, в частности, подобрать наиболее точный метод косвенного определения заданной физической величины, а также оценить предельную погрешность вычисления.

Обратная задача заключается в вычислении погрешностей аргументов, если известна или задана погрешность функциональной зависимости. Ее приходится решать, когда требуется найти допустимые погрешности прямых измерений, обеспечивающие заданный уровень погрешности величины, определяемой косвенным путем. Так, часто необходимо найти допустимые погрешности расходов компонентов топлива и тяги, при которых обеспечивается заданная точность определения удельного импульса тяги ЖРД.

В общем виде обратная задача для нескольких независимых аргументов не решается, поскольку ее условие может быть выполнено при различных комбинациях значений погрешностей аргументов. В этом случае вводятся дополнительные требования и ограничения, связан-

ные, например, с возможностями и стоимостью оборудования. Иногда принимается так называемый принцип равных влияний, в соответствии с которым погрешности, вызванные влиянием каждого аргумента, оказывают одинаковое влияние на погрешность функции.

2.6. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМАМ ИЗМЕРЕНИЙ. ОЦЕНКА ИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ И ПОГРЕШНОСТЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

Важным этапом подготовки испытания является подбор средств измерений и согласование метрологических характеристик системы измерений с требованиями, предъявляемыми к измеряемым параметрам.

При назначении параметров, подлежащих измерениям, обычно известными или заданными являются пределы и характер изменения физической величины, ее частотный диапазон, а также необходимая точность измерений. Кроме того, должны быть известны или оценены условия, в которых будут работать средства измерений.

В соответствии с перечисленными требованиями выбирают средства измерений, основные характеристики которых приведены в паспортах или аттестатах.

Согласование частотных характеристик измеряемого параметра и используемой измерительной системы особенно важно в случае определения быстроменяющихся величин, поскольку только при этом условии можно правильно оценить характер их изменения по времени.

При назначении точности измерений следует основываться на анализе последствий допущенных погрешностей. Необходимо помнить, что назначение неоправданно жестких требований к точности измерений приводит к удорожанию и усложнению эксперимента. Уменьшение значения случайной погрешности может быть достигнуто, как известно, путем проведения многократных измерений. Действительно, среднее квадратическое отклонение среднего арифметического

$$S_{\bar{x}} = S/\sqrt{n},$$

где S – среднее квадратическое отклонение результата единичного измерения.

Особое значение приобретают многократные измерения при определении некоторых параметров ЖРД и отдельных его узлов на установив-

шихся режимах. Это связано с тем, что постоянство режима на практике может быть обеспечено лишь приближенно, так как всегда имеет место некоторое изменение величин, определяющих режим, что вызывается случайными и детерминированными колебательными процессами, особенностями работы смежных систем, в том числе системы регулирования и т.п. Например, при испытаниях центробежных насосов часто отмечают колебания давления на выходе, амплитуда которых достигает 10 % от среднего значения.

Единичными измерениями можно ограничиться только в том случае, когда есть уверенность, что погрешность результата определяется не случайными погрешностями эксперимента, а погрешностью средства измерений.

Для оценки возможности пренебрежения систематической или случайной погрешностями используют критерий, приведенный в ГОСТ 8.207–76. Случайную погрешность можно считать пренебрежимо малой, когда

$$\theta / S_{\bar{x}} > 8, \tag{2.32}$$

а систематическая погрешность будет пренебрежимо малой, когда

$$\theta / S_{\bar{x}} < 0{,}8, \tag{2.33}$$

где θ – предельная систематическая погрешность; $S_{\bar{x}}$ – среднее квадратическое отклонение среднего арифметического.

При этом погрешность, возникающая из-за пренебрежения одной из составляющих погрешности результата измерения, не превышает 15 %.

При определении погрешностей нужно учитывать лишь неисключенные остатки систематических погрешностей. Часть систематических погрешностей исключают введением поправок или соответствующей организацией измерений. Для этой цели используют, например, данные индивидуальных или стандартных градуировок измерительных приборов или отдельных преобразователей измерительной цепи, коррекцию нуля. Необходимо также помнить, что освободиться от постоянной систематической погрешности средства измерения путем обработки результатов измерений нельзя, так как она не уменьшается при осреднении результатов. Другими словами, многократные измерения не приводят к уменьшению систематической погрешности.

Если на результат измерения воздействуют несколько факторов, приводящих к неисключенным систематическим погрешностям, то необ-

ходимо найти суммарную систематическую погрешность. Такое положение имеет место, когда причинами, вызывающими эти погрешности, являются не только собственно средства измерений, но и применяемый метод или имеется несколько элементов средства измерений (измерительной цепи), каждый из которых характеризуется своим значением неисключенной систематической погрешности θ_i.

Границы суммарной неисключенной систематической погрешности θ вычисляют путем определения композиции неисключенных систематических погрешностей, в том числе погрешностей метода. При их равномерном распределении суммарная неисключенная систематическая погрешность может быть вычислена по формуле

$$\theta = \pm k \sqrt{\sum_{i=1}^{m} \theta_i} . \qquad (2.34)$$

Здесь k – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью. При доверительной вероятности $\gamma = 0{,}95$ $k = 1{,}1$. При других значениях γ значение k можно определить по графику, приведенному в ГОСТ 8.207–76.

Оценка среднего квадратического отклонения результата измерений S_Σ, при которых имеется несколько источников появления случайных погрешностей, каждый из которых характеризуется своим значением S_i, производится путем их суммирования. При этом необходимо принимать во внимание возможные взаимные корреляционные связи между суммируемыми значениями.

Если корреляция отсутствует (коэффициент корреляции $\rho = 0$), то суммирование средних квадратических значений погрешностей S_i нужно производить по формуле

$$S_\Sigma = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^{n} S_i^2} . \qquad (2.35)$$

При сильной корреляции погрешностей ($\rho = 1{,}0$) суммирование средних квадратических отклонений значений погрешностей выполняют по формуле

$$S_\Sigma = \pm \sum_{i=1}^{n} S_i \qquad (2.36)$$

Коэффициент корреляции случайных величин x и y может быть вычислен по формуле

$$\rho = \sqrt{1 - (S_{\Delta y}/S_{\bar{y}})^2} = \sqrt{1 - (2\vartheta)^2} \,. \qquad (2.37)$$

Здесь $S_{\Delta y}$ и $S_{\bar{y}}$ – средние квадратические отклонения отдельных точек соответственно от линии $y = f(x)$ (рис.2.7) и от среднего арифметического значения $\bar{y}$; $\vartheta = L_{\Delta y}/(2L_y)$ – приведенная погрешность.

В связи с тем, что на практике трудно вычислять точные значения коэффициентов корреляции, можно принять следующую методику. Все погрешности по степени коррелированности делят на два вида – сильно коррелированные ($\rho > 0{,}7$) и слабо коррелированные ($\rho \leqslant 0{,}7$). К сильно коррелированным могут быть отнесены погрешности, вызванные одной и той же причиной (например, общим источником питания, примерно одинаковым влиянием температуры и т.п.). При этом ясно просматриваются корреляционные связи, и коэффициент корреляции можно принять равным единице. Для погрешностей, между которыми не обнаруживаются корреляционные связи, принимают $\rho = 0$.

Внутри групп сильно коррелированных погрешностей производится алгебраическое суммирование, а суммарные по группам и оставшиеся вне групп погрешности принимаются некоррелированными и складываются по правилу $S_{\Sigma}^2 = \Sigma S_i^2$.

Если известно, что систематическая и случайная погрешности соизмеримы, т.е. не выполняются условия (2.32) и (2.33), то в соот-

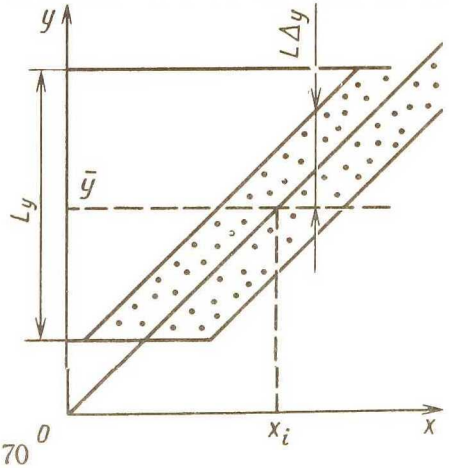


Рис.2.7. Пример области разброса коррелированных случайных величин: $L_{\Delta y}$ – ширина полосы разброса экспериментальных точек вдоль оси y; L_y – длина полосы разброса экспериментальных точек вдоль оси y; * – точка экспериментальная

ветствии с ГОСТ 8.207–76 границу полосы разброса погрешностей результата измерений находят путем построения законов распределения случайных и неисключенных систематических погрешностей, которые рассматривают как случайные величины. Если случайные погрешности имеют нормальное распределение, то границы полосы разброса погрешностей результата измерений можно вычислить по формуле

$$\Delta_{\Sigma} = KS'_{\Sigma}, \tag{2.38}$$

где K – коэффициент, зависящий от соотношения случайной и неисключенной систематической погрешностей; S'_{Σ} – оценка суммарного среднего квадратического отклонения результата измерений.

Указанные величины вычисляются по формулам

$$S'_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{\theta_i^2}{3} + S_{\bar{x}}^2}, \tag{2.39}$$

$$K = (\Delta + \theta) \Big/ \left[S_{\bar{x}} + \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{\theta_i^2}{3}} \right]. \tag{2.40}$$

При определении погрешности результата косвенного измерения необходимо, как это было показано в подразд.2.5, учитывать "вклад" в нее каждой составляющей погрешности прямого измерения.

Оценка погрешности измерения основных параметров двигателей по результатам испытаний связана с известными трудностями, которые в значительной степени определяются спецификой испытаний. Сюда относится широкое применение многозвенных измерительных цепей, ЭВМ, всякого рода нестандартных средств измерения (например, тягоизмерительных устройств, уровнемеров и т.п.), градуировочные характеристики которых необходимо определять непосредственно в условиях стенда, и наличие значительных дестабилизирующих факторов при работе двигателя, приводящих к изменению характеристик средств измерения. Возникают также трудности методического характера, связанные с отсутствием четких рекомендаций по определению доверительной вероятности применительно к косвенным измерениям при наличии в них случайных и систематических погрешностей, со сложностью нахождения систематических погрешностей и т.п.

Если основные параметры двигателей определяют с помощью многозвенных измерительных цепей, то каждое звено, как было показано, характеризуется своей погрешностью, влияющей на общую погрешность измеряемого параметра. На точность измерения будут влиять также погрешности градуировочных устройств и производимых вычислений.

Работу по оценке погрешностей нужно начинать с логического анализа процесса измерения, при котором рассматривают методику и условия снятия градуировочных характеристик, различия условий работы средства измерений при градуировке и испытании, методики собственно измерений и математической обработки результатов. Таким образом, необходимо провести анализ всех этапов процесса измерения, начиная с градуировки средств измерений и кончая выдачей результатов измерений.

Результатом логического анализа должна быть структурная схема возникновения погрешностей, на основе которой строят пооперационный процесс их оценки. В общем случае в структурной схеме должны быть учтены погрешности определения градуировочных характеристик средства измерений и погрешности измерения, возникающие при проведении испытания.

Предельную погрешность градуировки можно определить по формуле, справедливой для случая нормального распределения случайных погрешностей градуировок и постоянства систематической погрешности при всех значениях измеряемой величины:

$$\Delta_{г} = tS_{г}/\sqrt{n_{г}} + \theta_{г}, \qquad (2.41)$$

где $S_{г}$ – среднее квадратическое отклонение, определяемое по разбросу градуировочных характеристик; $n_{г}$ – число градуировок; $\theta_{г}$ – систематическая погрешность средства градуировки (к которой может быть отнесена, например, имеющая место при градуировке силоизмерителей погрешность градуировочных грузов, определяемая их классом точности).

Таким образом, случайная погрешность, вносимая градуировкой, может быть существенно уменьшена при многократном ее проведении и использовании осредненной характеристики, построенной, например, методом наименьших квадратов.

Другая группа погрешностей включает:

средние квадратические отклонения случайных погрешностей средства измерений $S_{с.изм}$, возникающих в процессе испытания;

средние квадратические отклонения случайных погрешностей $S_{дест}$ из-за воздействия дестабилизирующих факторов;

систематические погрешности $\theta_{усл.р}$, связанные с отличием условий работы средства измерений при градуировке и испытании;

средние квадратические отклонения случайных погрешностей $S_{рег}$ и систематические погрешности $\theta_{рег}$ средств регистрации;

средние квадратические отклонения случайных погрешностей $S_{мет}$ и систематические погрешности $\theta_{мет}$ методического характера.

После построения структурной схемы измерительной цепи ее делят на отдельные звенья и оценивают систематические и случайные погрешности каждого звена.

Элементарные погрешности определяют по результатам специально поставленных экспериментов, статистическим или паспортным данным.

Случайные погрешности определяют по обычной схеме, описанной в подразд.2.3, после чего проводят выборочную оценку коэффициентов корреляции между погрешностями каждой пары звеньев, характеризующих меру их зависимости.

Если коэффициент корреляции равен нулю или достаточно мал, то можно принять, что связь между погрешностями отдельных звеньев отсутствует, т.е. они являются независимыми. В противном случае взаимосвязь между погрешностями необходимо учитывать при последующем анализе.

Систематические погрешности отдельных звеньев могут быть оценены путем использования образцовых средств измерений с помощью специально поставленных экспериментов или по паспортным данным.

При сложении перечисленных элементарных погрешностей появляется суммарная погрешность измерения. Наиболее полной характеристикой точности измерения исследуемого параметра является предельная погрешность, имеющая заданную доверительную вероятность и включающая элементарные погрешности как систематического, так и случайного характера.

Для определения предельной погрешности измерительной цепи с учетом погрешности градуировки может быть использована формула

$$\Delta'_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \Delta_i^2 + \Delta_г^2}, \qquad (2.42)$$

где Δ_i – предельная погрешность i-го звена цепи; $\Delta_г$ – погрешность градуировки, определяемая по формуле (2.41).

2.7. ПРИВЕДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ К НОМИНАЛЬНЫМ УСЛОВИЯМ

На работу ЖРД и уровень его выходных параметров (тягу, удельный импульс тяги, давление в камере сгорания, соотношение расходов компонентов и т.д.) оказывают влияние внешние факторы. Поэтому при проверке соответствия основных показателей ЖРД ТУ, а также для возможности сравнения различных ЖРД одной серии и контроля стабильности процесса производства необходимо полученные при огневом испытании результаты приводить к номинальным значениям внешних факторов. Обычно приведение осуществляют по следующим внешним факторам:

давлению окислителя $p_{вх.о}$ и горючего $p_{вх.г}$ на входе в ЖРД;

температуре (или плотности) окислителя $t_{вх.о}$ и горючего $t_{вх.г}$ на входе в ЖРД;

давлению окружающей среды p_H (при приведении тяги и удельного импульса);

параметрам, характеризующим положение органов настройки регуляторов ЖРД (углу поворота вала привода системы регулирования тяги φ, углу поворота вала привода системы одновременного опорожнения баков a).

Приведение к номинальным значениям внешних факторов производят через коэффициенты влияния (частные производные по отдельным внешним факторам), которые определяют расчетным путем и уточняют по экспериментальным данным. Например, в общем виде формула приведения тяги ЖРД у Земли к номинальным условиям может быть представлена в виде

$$P_{пр} = P_{изм} + \frac{\partial P}{\partial \varphi}\Delta\varphi + \frac{\partial P}{\partial a}\Delta a + \frac{\partial P}{\partial p_{вх.о}}\Delta p_{вх.о} + \frac{\partial P}{\partial p_{вх.г}}\Delta p_{вх.г} +$$

$$+ \frac{\partial P}{\partial t_{вх.о}}\Delta t_{вх.о} + \frac{\partial P}{\partial t_{вх.г}}\Delta t_{вх.г} + \frac{\partial P}{\partial p_H}\Delta p_H, \qquad (2.43)$$

где $P_{пр}$, $P_{изм}$ – соответственно приведенное к номинальным внешним факторам и измеренное при испытании значения тяги; P – текущее значение тяги; $\Delta\varphi$, Δa, $\Delta p_{вх.о}$ и т.д. – отклонения соответствующих значений внешних факторов от номинальных значений, т.е. $\Delta\varphi = \varphi_{изм} - \varphi_{ном}$; $\Delta a = a_{изм} - a_{ном}$ и т.д. Здесь, как и ранее, индексом "изм" обозначены измеряемые параметры, а индексом "ном" – номинальные.

Аналогичный вид имеют формулы приведения и других параметров ЖРД к номинальным значениям внешних факторов.

Влияние некоторых факторов в эксплуатационном диапазоне их изменения на тот или иной параметр может быть незначительным, и тогда им пренебрегают и соответственно упрощают формулу приведения.

Уровень выходного параметра, приведенного к номинальным условиям, определяется лишь внутридвигательными факторами и характеризует, таким образом, состояние данного конкретного двигателя.

2.8. ОСНОВНЫЕ ПРИЕМЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Чаще всего целью эксперимента является установление зависимости некоторых характерных параметров от тех или иных факторов. В то же время полученные в ходе эксперимента данные имеют, как отмечалось, отклонения от истинных значений и в ряде случаев могут быть недостоверными. Правильно выполненная обработка полученных опытных результатов позволяет не только построить экспериментальные зависимости, но также оценить и обеспечить их достоверность, придать им вид, наиболее удобный для последующего использования.

Приступая к обработке экспериментальных данных, необходимо убедиться в их достоверности. Проверку достоверности можно производить различными способами, причем применение некоторых из них предопределено сущностью исследуемых процессов. Например, при исследовании отдельных элементов ЖРД для проверки достоверности экспериментальных данных могут быть применены те или иные законы сохранения (массы, количества движения, энергии и т.д.). Если они с достаточной точностью выполняются для полученных экспериментальных данных, то это может служить одним из признаков их достоверности.

В некоторых случаях физическая сущность исследуемого процесса достаточно ясна и поэтому представляется возможным предсказать результат эксперимента в определенных точках или при определенных

условиях. Например, известно, что не будет расхода рабочего тела при отсутствии перепада давлений, что удельный импульс ЖРД в вакууме практически не будет зависеть от расхода компонентов топлива и т.п.

Подобные априори известные закономерности применимы также для проверки достоверности полученных в эксперименте данных.

Далее должен быть проведен анализ резко отклоняющихся значений измеряемых величин и исключены из рассмотрения те из них, которые могут быть квалифицированы как промахи. Однако отбрасывание всех резко отклоняющихся величин без предварительного анализа недопустимо, поскольку они могут отражать сущность исследуемого процесса, особенно на границах диапазона измерения.

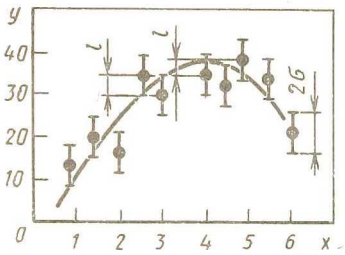
Оценку достоверности резко выпадающих точек следует осуществлять с помощью специально разработанных статистических методов, позволяющих судить о принадлежности их ко всей совокупности полученных результатов.

Простейший из подобных методов заключается в использовании "правила 3σ", в соответствии с которым промахами признают точки, выходящие за диапазон 3σ. При этом оценка среднего квадратического отклонения определяется по выборке, из которой исключены резко выпадающие результаты измерения. Более обоснованным является гостированный метод для случая нормального распределения, учитывающий объем выборки и уровень вероятности. Разработаны также эмпирические зависимости для оценки резко выпадающих результатов измерений и для некоторых других законов распределения.

Как отмечалось, в большинстве случаев исследуемая величина зависит от тех или иных параметров, которые можно изменять в ходе эксперимента, а задача исследования состоит в нахождении соответствующей функциональной зависимости. Наиболее наглядное представление о связи рассматриваемых величин дает графическая зависимость, которая может быть использована для некоторых вычислительных целей, например для графической интерполяции и экстраполяции.

Для того чтобы графическая зависимость наиболее полно отражала закон изменения исследуемой величины, необходимо соблюдать определенные правила построения. Масштаб следует выбирать так, чтобы графическая зависимость не была слишком плоской. Разметку шкал целесообразно делать таким образом, чтобы цена наименьшего деления была примерно равна значению среднего квадратического отклонения. При слишком крупном масштабе разброс точек может затруднить, а в некоторых случаях и сделать невозможным выявление закономерности

Рис. 2.8. Зависимость $y = f(x)$, построенная методом наименьших квадратов



изменения исследуемой величины. При очень мелком масштабе случайные отклонения полностью сглаживаются и тогда трудно дать заключение о качестве выполненного эксперимента.

При построении графической зависимости наносят все экспериментальные точки. Если одна точка соответствует нескольким результатам измерения, то можно использовать среднее значение и указать разброс. Разные серии измерений, а также прямой и обратный ходы выделяют с помощью различных обозначений (кружков, треугольников, крестиков и т.п.) и цветов. Иногда для экспериментальных точек указывают границы среднего квадратического отклонения результатов измерения σ (рис.2.8).

Если представляется возможность, то систему координат следует выбирать таким образом, чтобы экспериментальные точки располагались вдоль прямой линии. При степенных и показательных функциях для этой цели используют, например, логарифмические или полулогарифмические координаты. Кроме того, логарифмические координаты позволяют охватить очень большой диапазон изменения переменных. В ряде специальных изданий имеются рекомендации по преобразованию осей координат для некоторых распространенных функций.

По нанесенным точкам строят экспериментальную графическую зависимость. Так как измеренные величины имеют определенный разброс, связанный в основном со случайными отклонениями от действительных значений, то возникает задача правильного построения зависимости. Выпадающие точки (промахи) следует, как отмечалось, исключить из рассмотрения. Кривая должна быть плавной без изломов и проходить как можно ближе ко всем нанесенным точкам. Нужно помнить, что всякого рода изломы, изменения кривизны и тому подобное должны быть четко обоснованы либо экспериментально, либо теоретически.

При проведении ответственных экспериментов к построению графических зависимостей предъявляют повышенные требования. Необходимо, чтобы построенная по экспериментальным точкам зависимость по возможности точно отражала истинную функциональную зависимость. Этого можно добиться применением метода наименьших квадратов, в соответствии с которым сумма квадратов отклонений l–невязок опытных точек от графической зависимости должна быть минимальной (см. рис.2.8).

Сумму самих невязок использовать нельзя, поскольку она может оказаться малой при больших отклонениях противоположного знака.

В ряде случаев для проведения углубленного анализа исследуемого процесса необходимо аппроксимировать полученные данные аналитической функцией. Вид аппроксимирующей функции $F(a)$ выбирают либо путем сопоставления полученной графической зависимости с известными и хорошо изученными функциями, либо исходя из априори известной физической сущности изучаемого явления. При аппроксимации целесообразно пользоваться различными функциями, которые обычно приведены в справочниках по математике.

Для построения аппроксимирующей функции необходимо определить из опыта n констант – свободных параметров a_n. Их проще всего найти одним из двух способов.

Первый способ заключается в использовании метода наименьших квадратов. Математически сформулированное требование метода наименьших квадратов запишется следующим образом:

$$s = \sum_{i=1}^{N} \left[F(x_i, a_1, a_2, \ldots, a_n) - \varphi(x_i)\right]^2 = \min. \qquad (2.44)$$

Здесь s – функция; N – число экспериментальных точек; $\varphi(x_i)$ – значение результата эксперимента в точке $x = x_i$.

Значения свободных параметров a_n можно определить решением следующей системы уравнений, составленных с условием минимума функции s:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial s}{\partial a_1} = 2 \sum_{i=1}^{N} \left\{\left[F(x_i, a_1, a_2, \ldots, a_n) - \right.\right. \\
&\left.\left. - \varphi(x_i)\right] \frac{\partial F}{\partial a_1}\right\} = 0; \\
&\frac{\partial s}{\partial a_2} = 2 \sum_{i=1}^{N} \left\{\left[F(x_i, a_1, a_2, \ldots, a_n) - \right.\right. \\
&\left.\left. - \varphi(x_i)\right] \frac{\partial F}{\partial a_2}\right\} = 0;
\end{aligned} \qquad (2.45)$$

.....

$$\frac{\partial s}{\partial a_n} = 2 \sum_{i=1}^{N} \left\{ \left[F(x_i, a_1, a_2, \ldots, a_n) - \right.\right.$$

$$\left.\left. - \varphi(x_i) \right] \frac{\partial F}{\partial a_n} \right\} = 0. \qquad (2.45)$$

Аппроксимирующую функцию часто выбирают в виде

$$F = a_1 + a_2 x + a_3 x^2 + \ldots + a_n x^{n-1}. \qquad (2.46)$$

Для этой функции система уравнений (2.45) запишется следующим образом:

$$\frac{\partial s}{\partial a_1} = 2 \sum_{i=1}^{N} \left[a_1 + a_2 x_i + a_3 x_i^2 + \ldots + \right.$$

$$\left. + a_n x_i^{n-1} - \varphi(x_i) \right] = 0;$$

$$\frac{\partial s}{\partial a_2} = 2 \sum_{i=1}^{N} \left\{ \left[a_1 + a_2 x_i + a_3 x_i^2 + \ldots + \right.\right.$$

$$\left.\left. + a_n x_i^{n-1} - \varphi(x_i) \right] x_i \right\} = 0; \qquad (2.47)$$

.....

$$\frac{\partial s}{\partial a_n} = 2 \sum_{i=1}^{N} \left\{ \left[a_1 + a_2 x_i + a_3 x_i^2 + \ldots + \right.\right.$$

$$\left.\left. + a_n x_i^{n-1} - \varphi(x_i) \right] x_i^{n-1} \right\} = 0.$$

После соответствующих преобразований получим

$$a_1 N + a_2 \sum_{i=1}^{N} x_i + a_3 \sum_{i=1}^{N} x_i^2 + \ldots +$$

$$+ a_n \sum_{i=1}^{N} x_i^{n-1} = \sum_{i=1}^{N} \varphi(x_i);$$

$$a_1 \sum_{i=1}^{N} x_i + a_2 \sum_{i=1}^{N} x_i^2 + a_3 \sum_{i=1}^{N} x_i^3 + \ldots +$$

$$+ a_n \sum_{i=1}^{N} x_i^n = \sum_{i=1}^{N} x_i \varphi(x_i); \qquad (2.48)$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

$$a_1 \sum_{i=1}^{N} x_i^{n-1} + a_2 \sum_{i=1}^{N} x_i^n + a_3 \sum_{i=1}^{N} x_i^{n+1} + \ldots +$$

$$+ a_n \sum_{i=1}^{N} x_i^{2n-2} = \sum_{i=1}^{N} x_i^{n-1} \varphi(x_i).$$

При решении данной системы уравнений встает вопрос о выборе числа свободных параметров n. При $n < N$ имеется единственное решение, при $n = N$ все экспериментальные точки совпадают с аппроксимирующей функцией (рис.2.9). В последнем случае имеет место недостоверное описание исследуемого явления из-за естественного разброса экспериментальных точек. При $n > N$ система допускает множество решений. Поэтому для удовлетворительного "сглаживания" полученных результатов следует выбирать $n << N$, а правильность выбора контролировать по значению среднего квадратического отклонения S_a экспериментальных точек от аппроксимирующей зависимости. Значение S_a должно быть близко к значению среднего квадратического отклонения параметров, характеризующих эксперимент ($S_a \approx S$).

Второй способ определения n констант заключается в подборе функции $F(x,a)$, совпадающей с экспериментальными данными в n точках, называемых опорными. Для определения n неизвестных параметров a_n составляют и решают систему из n уравнений:

$$F(x_1, a_1, a_2, \ldots, a_n) = \varphi(x_1);$$

$$F(x_2, a_1, a_2, \ldots, a_n) = \varphi(x_2); \qquad (2.49)$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

$$F(x_n, a_1, a_2, \ldots, a_n) = \varphi(x_n).$$

Качество аппроксимации определяют путем наложения полученной зависимости на поле экспериментальных точек. Если при этом обнару-

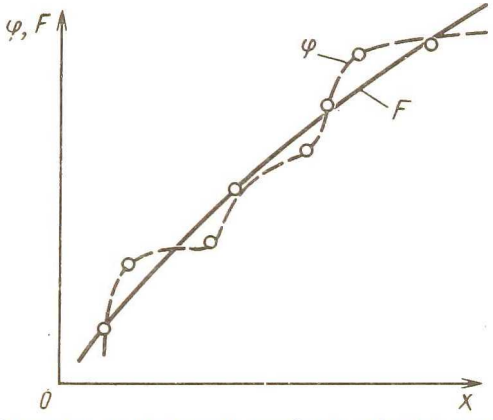


Рис. 2.9. Аппроксимирующая функция, полученная по экспериментальным данным: —— при небольшом числе свободных параметров; — — — при большом числе свободных параметров; ∘ — точка экспериментальная

живают существенное отклонение от некоторых точек, признаваемых достоверными, то экстраполяцию повторяют, принимая в качестве опорных другие или дополнительные точки. Согласно изложенным ранее соображениям не следует добиваться полного совпадения аппроксимирующей функции со всеми экспериментальными точками, которое имеет место при увеличении числа опорных точек до $n = N$. Следует отметить, что описываемый способ нагляден, но он не учитывает статистического распределения погрешностей и поэтому является относительно грубым.

Задача аппроксимации усложняется для функции, зависящей от нескольких переменных, но подходы к ее решению в принципе аналогичны описанным ранее.

При работе с экспериментальными результатами часто приходится применять интерполяцию и экстраполяцию. Возможно использование как графических, так и математических способов их выполнения. Последние особенно удобны при наличии аппроксимирующих функций, значения которых в заданной точке находят с помощью имеющегося уравнения. Если используют ЭВМ, то удобна интерполяционная функция Лагранжа, значение φ которой в точке x находят по известным данным x_1, φ_1; x_2, φ_2; ...; x_n, φ_n:

$$\varphi = \varphi_1 \frac{(x-x_2)(x-x_3)\dots(x-x_n)}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)\dots(x_1-x_n)} + \varphi_2 \frac{(x-x_1)(x-x_3)\dots(x-x_n)}{(x_2-x_1)(x_2-x_3)\dots(x_2-x_n)} + \dots + \varphi_n \frac{(x-x_1)(x-x_2)\dots(x-x_{n-1})}{(x_n-x_1)(x_n-x_2)\dots(x_n-x_{n-1})}. \quad (2.50)$$

Дополнительные трудности возникают при интерполяции на больших отрезках со значительным числом узловых точек. В этом случае удоб-

но применять сплайн-интерполяцию. Она заключается в следующем. Исследуемый диапазон разбивают на некоторое число участков, каждый из которых аппроксимируют кривой, описываемой многочленом степени n–1 вида (2.46). Часть свободных параметров каждого такого многочлена определяют из условия непрерывности функции и ее производных до n–2 порядка на всем участке включая точки стыковки. Остальные свободные параметры находят методом наименьших квадратов. Функция – многочлен, описывающий кривую, аппроксимирующую результаты эксперимента на выделенном участке и являющуюся непрерывной вместе со своими производными до n–2 порядка на всем протяжении участка включая точки стыковки, называется сплайном.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под принципом и методом измерения?
2. Что понимают под прямыми, косвенными и совместными измерениями?
3. Какие методы прямых измерений Вам известны?
4. Что такое погрешности измерений и по каким признакам их можно классифицировать?
5. Какие обозначения приняты для маркировки класса точности измерительного прибора и как они связаны с характером проявления погрешности?
6. Какие две величины необходимы для характеристики случайной погрешности измерения?
7. В каких случаях для характеристики случайной погрешности измерения применяют среднее квадратическое отклонение единичного результата измерения и среднее квадратическое отклонение среднего арифметичсекого результата измерения?
8. Как определяют доверительный интервал и доверительную вероятность при малом числе измерений?
9. Какова связь между средним квадратическим отклонением результата косвенного измерения и соответствующими средними квадратическими отклонениями результатов прямых измерений?
10. Каковы условия возможности пренебрежения систематической или случайной погрешностью?
11. Как оценить погрешность результата измерения, если известно, что систематическая и случайная погрешности являются соизмеримыми?

Глава 3

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДАХ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

3.1. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ И ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Современный ЖРД – это сложное дорогостоящее изделие. Чтобы минимизировать затраты и сроки на его разработку – выбор оптимальных конструктивных вариантов его узлов, доводку, определение и подтверждение основных характеристик, а также оценку надежности, требуются совершенные методы планирования эксперимента.

Под планированием эксперимента понимают выбор числа опытов, а также условий их проведения, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью. Но решение ее осложняется тем, что на параметры и работоспособность двигателя влияет большое число как внешних, так и внутренних факторов. Поиск оптимальных вариантов конструкций или условий реализации процессов, проверка надежности двигателя и его элементов связаны с необходимостью проведения эксперимента при различных сочетаниях этих факторов. Зачастую выбор этих сочетаний производится интуитивно. Однако постоянная тенденция к усложнению двигателей, ужесточению требований по надежности и ресурсу требует привлечения обоснованного математического аппарата к решению задачи оптимизации программ эксперимента.

Методы планирования эксперимента могут широко применяться как при проведении автономных испытаний элементов двигателей, так и при проведении испытаний двигателей в сборе. Оптимальное соотношение объемов автономных испытаний основных узлов и огневых испытаний двигателя в целом в процессе ОКР согласно ГОСТу устанавливает разработчик двигателя в КПЭО.

Исследование простых технических систем, как правило, ведут методами "классического", или однофакторного эксперимента, когда экспериментатор последовательно изменяет каждый из влияющих факторов, сохраняя все остальные неизменными. Полученные результаты представляют в виде четких функциональных связей. Естественно,

что для многофакторных систем, какой является ЖРД, проведение эксперимента, учитывающего влияние всех факторов при их значительном числе, практически не осуществимо. Если же отказаться от выявления всех закономерностей исследуемого процесса и ограничиться более узкой задачей, то можно существенно сократить число опытов. Это достигается применением теории эксперимента, базирующейся на положениях математической статистики и теории вероятностей.

Современные методы планирования эксперимента не требуют поочередного определения влияния каждого фактора, а делают возможными при одновременном варьировании нескольких влияющих факторов нахождение оптимальных условий реализации процесса, оценку работоспособности двигателя, его элементов и т.п. Они позволяют также разработать последовательность операций при подготовке и проведении опытов, анализе их результатов и принятии решений на основе полученных материалов.

Методами планирования эксперимента могут быть решены следующие задачи:

1. Поиск оптимальных условий реализации процесса, когда установлена принципиальная возможность его проведения.

2. Выяснение механизма процесса и построение интерполяционных формул, дающих приближенное математическое описание исследуемого процесса и позволяющих определить роль тех или иных факторов, влияющих на состояние объекта.

3. Выбор наиболее приемлемой гипотезы о механизме явлений, а также оценка или уточнение констант теоретических моделей.

Методы планирования эксперимента описаны в специальной литературе. Здесь рассмотрены лишь принципиальные подходы к проблеме планирования эксперимента.

При исследовании сложных систем с недостаточно ясными внутренними связями, к которым можно отнести ЖРД, обычно используют кибернетическую модель, которую часто называют "черным ящиком" (рис.3.1). Стрелки y_i изображают выходные численные характеристики. Эти характеристики называют целевыми функциями, параметрами оптимизации или выходными параметрами "черного ящика". К ним можно отнести тягу ЖРД, параметры, определяющие его работоспособность, давление в камере сгорания и т.п.

Способы воздействия на работу "черного ящика" x_i называют факторами или входными параметрами "черного ящика". К ним можно отне-



Рис. 3.1. Схема "черного ящика"

сти все внешние и внутренние факторы, которые оказывают влияние на основные выходные характеристики ЖРД.

При решении задач планирования эксперимента используют математическую модель объекта исследования, под которой понимают уравнение, связывающее целевую функцию с факторами:

$$y = f(x_1, x_2, \ldots, x_n). \qquad (3.1)$$

Подобную функцию называют функцией отклика. Под входящими в нее величинами y, x_i можно понимать как сами параметры ЖРД, так и их отклонения от номинальных значений.

Построение математической модели или определение функции отклика является важнейшей задачей эксперимента при использовании данного метода, так как с ее помощью можно предсказать значения функции, т.е. отклика в тех состояниях, которые не изучались прямым экспериментом.

3.2. ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ И ФАКТОРЫ

Когда целью эксперимента является определение, например, оптимальных условий протекания процесса, нужно выбирать одну целевую функцию. Иногда целевую функцию получают обобщением нескольких наиболее важных параметров, характеризующих ЖРД, например удельного импульса тяги и удельной массы.

В противоположность этому при проведении эксперимента с целью математического описания исследуемого процесса желательно получение целевых функций для всей совокупности параметров, характеризующих объект исследования.

К целевой функции предъявляют ряд требований. Она должна быть:

количественной, т.е. выражаться в числовой форме. Если нет способа количественной оценки результата, то используют ранговый подход (ранжирование), в этом случае целевой функции присваивают оценки – ранги по предварительно выбранной шкале;

однозначной в статистическом смысле, т.е. конкретному набору факторов должно соответствовать одно значение целевой функции;

эффективной, т.е. действительно оценивать эффективность системы;

существующей для всех возможных состояний системы в исследуемой области.

Фактором называют измеряемую переменную величину, воздействующую на объект исследования. Каждый фактор имеет область определения, под которой понимают совокупность всех значений, которые он может принимать в зависимости от условий эксплуатации. Область определения может быть непрерывной и дискретной. Факторы разделяют на количественные и качественные. К последним можно отнести, например, отличающиеся по своим характеристикам топлива, способы ведения рабочего процесса, различные испытательные стенды. Здесь следует отметить, что хотя качественным факторам, в отличие от количественных, не соответствуют числовые значения, представляется возможным построить условную порядковую шкалу, которая позволит привести в соответствие уровням качественных факторов числа натурального ряда, т.е. произвести кодирование.

К факторам предъявляют следующие требования:

они должны быть управляемыми, т.е. должна существовать возможность задания и поддержания их постоянными в процессе эксперимента;

они должны быть операциональными. Это требование выполняется, если однозначно определена последовательность операций, с помощью которых устанавливаются конкретные значения (уровни) факторов (например, заданное значение такого фактора, как соотношение компонентов топлива, может быть получено как изменением расхода горючего, так и изменением расхода окислителя.

Точность измерения факторов должна быть возможно более высокой.

К совокупности факторов предъявляют дополнительные требования:

совместимость, т.е. все их комбинации должны быть осуществимы и безопасны;

независимость факторов в совокупности, т.е. должна обеспечиваться возможность фиксирования конкретного фактора на любом уровне вне зависимости от уровней других факторов.

Если число факторов велико, то это приводит к увеличению числа экспериментов. Поэтому при числе факторов более семи целесообразно отсеять несущественные факторы. Эту задачу решают или на основании предварительных теоретических расчетов, или на основании опыта работы ОКБ – разработчика двигателя. В то же время, если не будет учтено влияние какого-либо существенного фактора, то это может привести к погрешностям в определении целевой функции.

3.3. ВЫБОР МОДЕЛИ

Под моделью, как отмечено, понимают функцию отклика в виде (3.1). Выбор модели – это выбор вида функции, т.е. определение ее уравнения. Если вид функции известен, то планируют и проводят эксперимент для оценки коэффициентов данного уравнения (коэффициентов регрессии). Основные требования к модели – адекватность и простота. Как известно, адекватность – это способность предсказывать результаты эксперимента в некоторой области с заданной точностью.

В планировании эксперимента обычно используют полиномиальные модели, являющиеся относительно простыми, удобными и хорошо разработанными в математическом смысле.

Для двух факторов полиномиальные модели выглядят следующим образом:

полином нулевой степени

$$y = b_0; \tag{3.2}$$

полином первой степени

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2; \tag{3.3}$$

полином второй степени

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2; \tag{3.4}$$

полином третьей степени

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{112} x_1^2 x_2 + b_{122} x_1 x_2^2 + b_{111} x_1^3 + b_{222} x_2^3. \tag{3.5}$$

Степень полинома нужно выбирать возможно меньшей, так как чем она меньше, тем меньше в уравнении коэффициентов, а следовательно, тем меньше требуется экспериментов для их определения.

Геометрическим аналогом функции отклика является поверхность отклика. Для наглядности рассмотрим "черный ящик" с двумя факторами. Под ними можно понимать изменение параметров, характери-

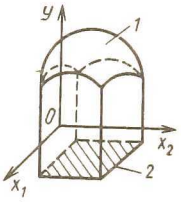


Рис.3.2. Поверхность отклика (1), полученная путем геометрической интерпретации, и область (2) определения факторов x_1 и x_2

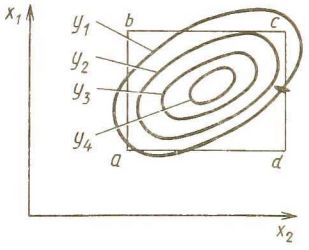


Рис.3.3. Проекции сечений поверхности отклика на плоскость: y_1, ..., y_4 – линии равного отклика; $abcd$ – область определения факторов

зующих положение органов регулирования ЖРД по каналам управления тягой (углу φ поворота вала привода системы регулирования тяги) и соотношения компонентов (углу α поворота вала привода системы одновременного опорожнения баков). Соответствующая поверхность отклика показана на рис.3.2, а проекции ее сечений на плоскость – на рис.3.3. При большем числе факторов геометрическая наглядность теряется.

Если решают задачу оптимизации конструкции, то основным требованием к модели является возможность предсказания с ее помощью направления наискорейшего улучшения исследуемого параметра. Такое направление называется направлением градиента. Данное требование проще всего выполнить путем использования полинома первой степени, т.е. линейной модели в сочетании с шаговым принципом движения к оптимуму.

Линейная модель будет адекватной при правильном выборе подобласти в факторном пространстве. Последнее возможно, так как практически всегда существует такая окрестность любой точки, в которой линейная модель адекватна.

В ряде случаев возникает необходимость построения интерполяционной модели, которая позволяет получить результат с требуемой точностью во всей заданной области, например в области экстремума. При этом линейное описание поверхности отклика может оказаться неадекватным. Поэтому приходится повышать порядок аппроксимирующего полинома. Но для большинства практических задач удовлетворительная точность может быть достигнута уже при использовании полиномов второго порядка.

3.4. ПОЛНЫЙ ФАКТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Проведению эксперимента должен предшествовать этап подготовки. Он начинается со сбора априорной информации об объекте исследования, и чем больше ее будет у экспериментатора, тем скорее можно достичь конечной цели исследования.

Априорная информация может быть получена из результатов предыдущих исследований аналогичных процессов или исследований однотипных двигателей. Эта информация дает понятие о параметре оптимизации, о факторах, о наилучших условиях ведения процесса и характере поверхности отклика, т.е. она позволяет судить о степени влияния факторов на целевую функцию. На основании априорной информации выбирают локальную область факторного пространства для проведения первой серии опытов.

При установлении локальной области проведения эксперимента определяют основной (нулевой) уровень – m-мерную точку в факторном пространстве (где m – число факторов), задаваемую комбинацией уровней факторов, а также выбирают интервалы варьирования. Для каждого фактора устанавливают два уровня (верхний и нижний), в пределах которых он изменяется при эксперименте. Основной уровень выбирают на базе анализа априорной информации.

Для упрощения фиксации условий эксперимента и обработки получаемых данных масштабы по осям факторов x_i задают так: верхний уровень +1, нижний уровень –1, а основной уровень – 0. Для факторов с непрерывной областью определения используют следующее преобразование:

$$x_i = (\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i0})/I_i, \qquad (3.6)$$

где x_i – кодированное значение фактора; $\tilde{x}_i$ – его действительное значение; $\tilde{x}_{i0}$ – действительное значение фактора на нулевом уровне; I_i – интервал варьирования.

Интервалом варьирования называют расстояние на координатной оси между основным и верхним (или нижним) уровнями.

При выборе интервалов варьирования необходимо учитывать точность, с которой определяют значения факторов в эксперименте. Естественно, что интервал варьирования не может быть меньше погрешности измерения факторов.

Таблица 3.1

Номер опыта	x_1	x_2	y
1	−1	−1	y_1
2	+1	−1	y_2
3	−1	+1	y_3
4	+1	+1	y_4

Эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания уровней факторов, называют полным факторным экспериментом. Число необходимых опытов при проведении полного факторного эксперимента $N = q^m$, где m и q – соответственно числа факторов и их уровней.

Если два фактора варьируются на двух уровнях, то реализуется полный факторный эксперимент типа 2^2. В табл.3.1 представлена матрица планирования эксперимента 2^2, а на рис. 3.4 дана ее геометрическая интерпретация.

Факторный эксперимент 2^m обладает рядом ценных свойств, которые упрощают математическую обработку его результатов. Это:

симметричность матрицы относительно центра эксперимента;

свойство нормировки, следствием которого является то, что факторы в матрице задаются уровнями +1 и −1;

ортогональность, в соответствии с которой все коэффициенты регрессии не зависят друг от друга;

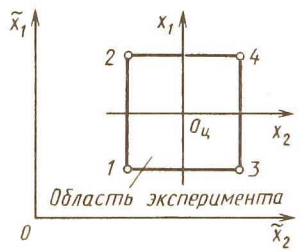


Рис. 3.4. Геометрическая интерпретация полного факторного эксперимента 2^2:
$0_ц$ – центр эксперимента; 1, ..., 4 – номера опытов

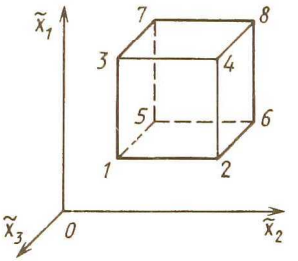


Рис. 3.5. Геометрическая интерпретация полного факторного эксперимента 2^3:
1, ..., 8 – номера опытов

ротатабельность ("круговая симметрия"), которая обеспечивает одинаковую точность предсказания целевой функции по любому направлению.

При планировании эксперимента, как отмечено, обычно используют кодированные уровни факторов: +1 и –1, причем часто для простоты записи единицы опускают. Каждый столбец в матрице планирования называют вектор-столбцом, а каждую строку – вектор-строкой.

Полный факторный эксперимент 2^3 будет иметь 8 опытов. Его матрица представлена в табл.3.2. Геометрической интерпретацией полного факторного эксперимента 2^3 служит куб, координаты вершин которого (1, ..., 8) задаются условиями опытов (рис.3.5).

По результатам эксперимента находят коэффициенты полиномов, определяющих математическую модель. Так, для линейной модели при полном факторном эксперименте 2^2 полином имеет вид

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2. \qquad (3.7)$$

Коэффициенты определяют методом наименьших квадратов, при котором минимизируется сумма квадратов невязок опытных значений функции отклика и величин, определенных с помощью модели. Поскольку полученное при эксперименте конкретное значение функции отклика является случайным и имеет какую-то погрешность, то для повышения надежности опыты можно повторить для каждой строки матрицы планирования.

Значения коэффициентов определяют по формуле

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^{N} x_{ij} y_j}{N}, \qquad (3.8)$$

где i – номер фактора (i = 1, 2, ..., m); j – номер опыта (j = 1, 2, ..., N); y_j – функция отклика при опыте с номером j; N – число опытов в матрице планирования.

Если опыты повторяют, то используют среднее значение функции отклика y_j.

Если число опытов в строчках матрицы неодинаково, то нарушается ее ортогональность и формулу (3.8) для подсчета коэффициентов регрессии нельзя применять. В этом случае необходимы более сложные

зависимости. По формуле (3.8) подсчитывают коэффициенты b_1 и b_2. Для эксперимента 2^2

$$b_1 = \frac{(-1)y_1 + (+1)y_2 + (-1)y_3 + (+1)y_4}{4};$$

$$b_2 = \frac{(-1)y_1 + (-1)y_2 + (+1)y_3 + (+1)y_4}{4}.$$

Вычисленные таким образом коэффициенты характеризуют уровень влияния каждого фактора на параметр оптимизации (целевую функцию) и называются коэффициентами регрессии. Коэффициент b_0 находят на основании следующих рассуждений. Если уравнение (3.7) справедливо, то оно справедливо и для средних арифметических значений переменных, т.е.

$$\bar{y} = b_0 + b_1\bar{x}_1 + b_2\bar{x}_2,$$

но в силу свойства симметрии $\bar{x}_1 = \bar{x}_2 = 0$, следовательно, $\bar{y} = b_0$.

Таким образом, b_0 представляет собой среднее арифметическое значение параметра оптимизации.

Для упрощения расчета коэффициента b_0 в матрицу планирования удобно ввести вектор-столбец фиктивной переменной x_0, которая

Таблица 3.2

Номер опыта	x_1	x_2	x_3	y	Номер опыта	x_1	x_2	x_3	y
1	–	–	+	y_1	5	–	–	–	y_5
2	–	+	+	y_2	6	–	+	–	y_6
3	+	–	+	y_3	7	+	–	–	y_7
4	+	+	+	y_4	8	+	+	–	y_8

Таблица 3.3

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	$x_1x_2(x_3)$	y
1	+	+	+	+	y_1
2	+	−	+	−	y_2
3	+	−	−	+	y_3
4	+	+	−	−	y_4

принимает во всех опытах значения +1. Тогда линейная модель имеет вид

$$y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 \qquad (3.9)$$

и все коэффициенты вычисляются по одной формуле (3.8).

После получения математической модели следует проверить ее адекватность, т.е. соответствие экспериментальным значениям функции отклика (целевой функции).

Полный факторный эксперимент содержит также информацию о нелинейности, обусловленной эффектами взаимодействия факторов. Наличие эффекта взаимодействия означает, что эффект от воздействия одного фактора зависит от уровня, на котором находится другой фактор, т.е. они коррелированы между собой. Для количественной оценки эффектов взаимодействия надо, пользуясь правилом перемножения вектор-столбцов, получить вектор-столбец произведения факторов. Для полного факторного эксперимента 2^2 матрица планирования с учетом эффекта взаимодействия представлена в табл.3.3.

Модель в этом случае имеет вид

$$y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2. \qquad (3.10)$$

Коэффициент взаимодействия b_{12} вычисляют, как и обычно, по формуле

$$b_{12} = \frac{(+1)y_1 + (-1)y_2 + (+1)y_3 + (-1)y_4}{4}.$$

С увеличением числа факторов растет число возможных взаимодействий.

Значимость коэффициентов модели, в том числе и коэффициентов взаимодействия, может быть проверена по критерию Стьюдента. Метод такой проверки описан далее.

3.5. ДРОБНЫЙ ФАКТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Число опытов в полном факторном эксперименте превышает число определяемых коэффициентов линейной модели. Причем это превышение будет тем больше, чем больше число факторов. В связи с этим представляется возможным сократить число опытов путем отказа от информации об эффектах взаимодействия факторов, которые будут тем меньше, чем более близка действительная модель к линейной.

Действительно, при полном факторном эксперименте 2^2 можно вычислить четыре коэффициента и результаты опытов представить в виде неполного квадратного уравнения

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2.$$

Если в выбранных интервалах варьирования процесс описывается линейной моделью, то достаточно определить три коэффициента – b_0, b_1 и b_2. Остающаяся одна степень свободы может быть употреблена для минимизации числа опытов. Так как при линейном приближении коэффициент взаимодействия $b_{12} \to 0$, то вектор-столбец $x_1 x_2$ матрицы (см. табл.3.3) можно использовать для нового фактора x_3. Однако в этом случае невозможно будет оценить эффекты взаимодействия, а коэффициент b_1, отражающий влияние фактора x_1, будет отражать также эффект взаимодействия факторов x_2 и x_3, т.е. $b_1 \to \beta_1 + \beta_{23}$. Здесь β – теоретические значения коэффициентов. Аналогично коэффициент b_2 будет являться смешанной оценкой влияния фактора x_2 и эффекта взаимодействия факторов x_1 и $x_3 (b_2 \to \beta_2 + \beta_{13})$, а коэффициент b_3 – оценкой влияния фактора x_3 и эффекта взаимодействия факторов x_1 и $x_2 (b_3 \to \beta_3 + \beta_{12})$. Но это не существенно, так как

для принятого нами случая приближения к линейной модели все парные взаимодействия будут незначительными.

Следовательно, достаточно выполнить лишь четыре опыта для оценки влияния трех факторов, т.е. воспользоваться половиной полного факторного эксперимента 2^3, или полурепликой. Если x_3 приравнивается к $-x_1x_2$, то получается вторая половина матрицы планирования эксперимента 2^3.

Таким образом, д р о б н а я р е п л и к а представляет собой часть полного факторного эксперимента, в котором q линейных эффектов приравниваются к эффектам взаимодействия. Дробная реплика обозначается 2^{m-k}. Условные обозначения некоторых дробных реплик и число опытов, необходимых для их реализации, приведены в табл.3.4.

Как следует из табл.3.4, применение дробных реплик позволяет существенно уменьшить число опытов и целесообразность их использования возрастает с увеличением числа факторов.

При проведении дробного факторного эксперимента можно выбирать различные дробные реплики. Если при выборе дробной реплики 2^{3-1} имеется лишь две полуреплики – решения: $x_3 = +x_1x_2$ или $x_3 = -x_1x_2$,

Т а б л и ц а 3.4

Число факторов	Дробная реплика	Условное обозначение	Число опытов	
			для дробной реплики	для полного факторного эксперимента
3	1/2 – реплика от 2^3	2^{3-1}	4	8
4	1/2 – реплика от 2^4	2^{4-1}	8	16
5	1/4 – реплика от 2^5	2^{5-2}	8	32
6	1/8 – реплика от 2^6	2^{6-3}	8	64
7	1/16 – реплика от 2^7	2^{7-4}	8	128

то при выборе дробной реплики 2^{4-1} уже возможно восемь полуреплик – решений:

1. $x_4 = x_1x_2$. 2. $x_4 = -x_1x_2$. 3. $x_4 = x_2x_3$.

4. $x_4 = -x_2x_3$. 5. $x_4 = x_1x_3$. 6. $x_4 = -x_1x_3$.

7. $x_4 = x_1x_2x_3$. 8. $x_4 = -x_1x_2x_3$.

Эффективность различных реплик не одинакова. Ее оценивают разрешающей способностью, которая может быть определена в результате анализа с использованием таких характеристик, как определяющий контраст и генерирующее соотношение.

О п р е д е л я ю щ и м к о н т р а с т о м называют произведение любых вектор-столбцов, при котором все элементы полученного нового вектора-столбца имеют одинаковые знаки. В том случае, если все знаки положительные, определяющему контрасту присваивают символическое обозначение +1, а если отрицательные, то –1. Например, для дробной реплики 2^{3-1} (табл.3.5) определяющий контраст запишет-

Таблица 3.5

Номер опыта	Полуреплика $x_3 = x_1x_2$				Полуреплика $x_3 = -x_1x_2$			
	x_1	x_2	x_3	$x_1x_2x_3$	x_1	x_2	x_3	$x_1x_2x_3$
1	+	+	+	+	+	+	–	–
2	–	–	+	+	–	–	–	–
3	+	–	–	+	+	–	+	–
4	–	+	–	+	–	+	+	–

ся в виде $1 = x_1x_2x_3$ для полуреплики $x_3 = x_1x_2$ и в виде $-1 = x_1x_2x_3$ для полуреплики $x_3 = -x_1x_2$.

С помощью определяющего контраста устанавливают систему смешивания линейных эффектов с эффектами взаимодействия. Чтобы определить, какие эффекты (двойные, тройные и т.д.) смешаны с данным линейным эффектом, нужно умножить обе части определяющего контраста на этот линейный эффект. Если определяющий контраст имеет вид $1 = x_1x_2x_3$, то, например,

$$x_1 = x_1^2x_2x_3 = x_2x_3,$$

так как всегда $x_i^2 = 1$.

Полученное соотношение называют генерирующим. Оно показывает, что линейный эффект от воздействия фактора x_1 смешан с парным эффектом от воздействия факторов x_2, x_3, т.е. $b_1 = \beta_1 + \beta_{23}$.

Таким образом, г е н е р и р у ю щ и м с о о т н о ш е н и е м называют соотношение, показывающее, с каким из эффектов смешан данный эффект. Генерирующее соотношение позволяет оценить разрешающую способность дробной реплики. Разрешающая способность последней будет тем выше, чем выше порядок взаимодействий, с которыми смешаны линейные эффекты. Это объясняется тем, что взаимодействия более высоких порядков (тройные в нашем случае) чаще бывают равными или близкими нулю, чем взаимодействия низших порядков. Для приведенных восьми решений, возможных при выборе полуреплик 2^{4-1}, наибольшей разрешающей способностью обладают решения 7 и 8, которые называют главными. При отсутствии априорной информации об эффектах взаимодействия следует выбирать дробные реплики с наибольшей разрешающей способностью – главные.

После составления плана проведения эксперимента в форме матрицы планирования осуществляется его непосредственное проведение.

Для исключения влияния систематических погрешностей, которые могут вызывать внешние условия, эксперимент рандомизируют во времени. Это означает, что подлежащие проведению опыты выполняют в случайной последовательности, например, путем использования таблицы случайных чисел, которая приведена в руководствах по математической статистике.

3.6. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТОВ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Результаты опытов обрабатывают статистическими методами с использованием регрессионного анализа. Вначале по формуле (3.8) определяют коэффициенты регрессии. Далее подсчитывают статистическое значение дисперсии целевой функции $S^2_{\{y\}}$ или, как ее принято называть в теории планирования эксперимента, дисперсию воспроизводимости:

$$S^2_{\{y\}} = \frac{\sum_{j=1}^{N} \sum_{\upsilon=1} (y_{j\upsilon} - \bar{y}_j)^2}{N(n-1)}, \qquad (3.11)$$

где $j = 1,2, \ldots, N$ – число опытов в матрице; $\upsilon = 1, 2, \ldots, n$ – число повторных (параллельных) опытов; $y_{j\upsilon}$ – значение целевой функции в конкретном опыте; $\bar{y}_j$ – среднее значение целевой функции при n повторных наблюдениях.

Последняя формула справедлива для случая, когда число повторных опытов одинаково во всей матрице. Если же число повторных опытов различно (например, из-за исключения результатов, содержащих грубые погрешности), то используют среднее взвешенное значение дисперсии.

В процессе анализа экспериментальных материалов производят также проверку значимости каждого коэффициента. Ее можно выполнить с использованием коэффициента Стьюдента t.

Вначале находят дисперсию коэффициента регрессии для числа повторных опытов n:

$$S^2_{\{b_i\}} = S^2_{\{y\}}/(nN). \qquad (3.12)$$

Далее подсчитывают значение коэффициента t для b_i:

$$t_i = |b_i|/S_{\{b_i\}}. \qquad (3.13)$$

Если при заданной доверительной вероятности и соответствующем числе степеней свободы t_i больше табличного значения коэффициента

Стьюдента t, то коэффициент b_i признают значимым. Если данное условие не выполняется, то b_i признают статистически незначимым, т.е. полагают, что $b_i = 0$.

После этого оценивают адекватность полученной модели. Адекватность модели удобно проверять с использованием критерия Фишера F:

$$F = S^2_{ад} / S^2_{\{y\}}. \qquad (3.14)$$

Здесь $S^2_{ад}$ – остаточная дисперсия или дисперсия адекватности.

Дисперсию адекватности подсчитывают по уравнению

$$S^2_{ад} = \frac{\sum_{j=1}^{N} \Delta y_j^2}{f}, \qquad (3.15)$$

где Δy_j – разность значений y, полученных в эксперименте и вычисленных по уравнению регрессии; f – число степеней свободы, равное разности между числом опытов и числом коэффициентов, вычисленных по результатам этих опытов.

Для линейного уравнения регрессии

$$f = N - (m + 1).$$

Рассчитанное значение критерия Фишера сравнивают с табличным для заданной доверительной вероятности. Если экспериментальное значение F меньше табличного, то модель можно считать адекватной.

При необходимости проверяют также однородность дисперсий с использованием критериев Фишера или Кохрэна.

После обработки результатов опытов производят их интерпретацию. На первом этапе устанавливают, как каждый из факторов влияет на целевую функцию. Чем больше коэффициент b_i, тем существеннее его влияние на целевую функцию. Знак плюс показывает, что с увеличением значения фактора увеличивается целевая функция, и наоборот. Далее оценивают взаимодействие факторов. Полученная информация позволяет проверить ранее принятую гипотезу о механизме процесса или выдвинуть новую.

На следующем этапе интерпретации модели принимают решение о дальнейших действиях в соответствии с имеющей место ситуацией. Си-

туации различают по адекватности и неадекватности модели, значимости и незначимости коэффициентов регрессии, по информации о положении области оптимума. При адекватной модели со значимыми коэффициентами может быть рекомендовано дальнейшее движение в направлении градиента или построение плана второго порядка в случае близости области оптимума.

Если часть коэффициентов незначима, то возможно движение по градиенту или построение плана второго порядка, а в случае желательности получения значимых коэффициентов регрессии – изменение интервалов варьирования, перенос центра эксперимента в другую область, отказ от незначимых факторов и т.д. Если все коэффициенты незначимы, то может быть принято решение об окончании исследования (область оптимума близка) либо реализации плана второго порядка.

Если линейная модель неадекватна, то требуется изменение интервалов варьирования либо переход к планам второго порядка.

Следует отметить, что для достижения области оптимума можно использовать помимо движения по градиенту и другие методы быстрого увеличения целевой функции. Среди них широкое распространение получил метод крутого восхождения. В отличие от движения по градиенту при методе крутого восхождения корректировка направления движения осуществляется не после каждого следующего шага, а после достижения в некоторой точке n частного экстремума целевой функции. На рис.3.6 представлены схемы движения к оптимуму с использованием соответственно методов движения по градиенту и крутого восхождения для двух факторов.

В последнее время все большее распространение получает симплексный метод планирования, при котором не требуется вычисления градиента. Симплексом называется простейший выпуклый многогранник в m-мерном пространстве, имеющий $m+1$ вершину, где m – число факторов. Для двух факторов это равносто-

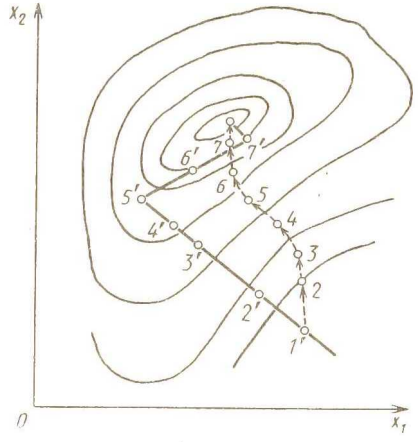


Рис.3.6. Схемы движения к оптимуму по методам движения в направлении градиента (– – – –) и крутого восхождения (——): 1′, 2′, ..., 1, 2 ... – номера экспериментов

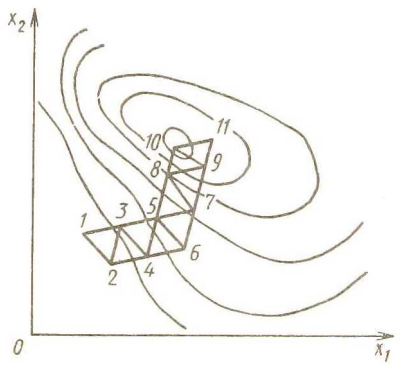


Рис.3.7. Схема движения симплекса: 1, ..., 11 – номера экспериментов

ронний треугольник (рис.3.7). Симплексный метод планирования заключается в выборе положения начального симплекса на основании априорной информации, проведении эксперимента, ранжировании его результатов по значению отклика и, наконец, в построении следующего симплекса на грани, противоположной вершине с наихудшим откликом.

Далее процесс повторяют.

При попадании в область оптимума симплекс начинает вращаться вокруг вершины с экстремальным значением отклика. Следует отметить, что при использовании данного метода погрешности эксперимента могут привести лишь к задержке в продвижении к области оптимума, а не остановить его. Поэтому проведение повторных опытов не обязательно. Эффективность симплексного метода возрастает при большом числе факторов.

Помимо задач оптимизации, при проведении опытно-конструкторских испытаний ЖРД обычно решают задачи:

подтверждения соответствия выходных параметров двигателя (тяги, удельного импульса тяги и др.) ТЗ во всей области его работоспособности, т.е. при различных сочетаниях внешних и внутренних факторов;

оценки вероятности безотказной работы двигателя при наиболее неблагоприятных сочетаниях факторов.

При решении этих задач часто приходится прибегать к использованию полиномов более высоких степеней. Принципиальные особенности планов второго порядка изложены в следующем разделе. Методы решения задач по подтверждению соответствия параметров ЖРД ТЗ приведены в работе [7].

3.7. ПЛАНЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОТКЛИКА

В ряде случаев для описания поверхности отклика бывает недостаточно полинома первой степени.

Для большинства практических задач хорошее приближение к нелинейной поверхности отклика обеспечивают полиномиальные модели второго порядка:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{m} b_i x_i + \sum_{j>1, i=1}^{m} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{m} b_{ii} x_i^2. \qquad (3.16)$$

Определить значения коэффициентов такой модели позволяет полный факторный эксперимент 3^m, так как число уровней варьирования факторов должно быть на единицу больше степени аппроксимирующего полинома. Число возможных сочетаний при полном факторном эксперименте $N = 3^m$.

При исследовании ЖРД такие факторные эксперименты практически не проводят из-за большого числа опытов, особенно при $m > 3$. В настоящее время разработано большое число планов второго порядка, более экономичных, чем планы полного факторного эксперимента 3^m.

Наиболее широкое применение при исследовании свойств нелинейных моделей получили композиционные планы, ядром которых служат линейные планы. В зависимости от того, какие точки добавятся к плану первого порядка, получают композиционные планы, обладающие различными свойствами. Симметричные центральные композиционные планы второго порядка строят путем добавления к исходному двухуровневому линейному плану – ядру, содержащему $N_я = 2^m$ точек с координатами $\pm 1, \pm 1, \ldots, \pm 1$, N_0 центральных точек с координатами $0, 0, \ldots, 0$ и $N_a = 2m$ аксиальных так называемых "звездных" точек, расположенных парами вдоль координатных осей и удаленных от центральной точки на расстояние $\pm a$, называемое "звездным" плечом. При этом общее число опытов $N = N_я + N_0 + N_a$. Геометрическая интерпретация центрального композиционного плана приведена на рис.3.8.

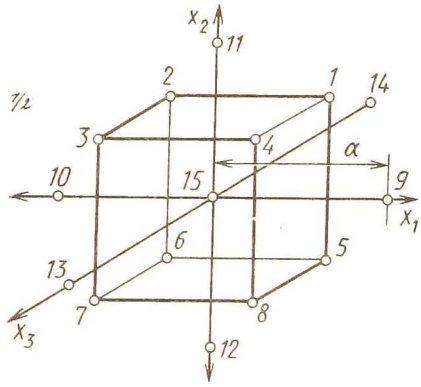


Рис.3.8. Геометрическая интерпретация центрального композиционного плана второго порядка для трех факторов:
1, ..., 15 – номера экспериментов

Свойства центральных композиционных планов в значительной степени зависят от звездного плеча. Выбрав соответствующим образом значение a, можно придать плану свойство ортогональности или ротатабельности.

Для построения ортогонального центрального композиционного плана нужно принять звездное плечо

$$a = \left[(N \cdot 2^{m-2})^{1/2} - 2^{m-2}\right]^{1/2} \qquad (3.17)$$

и преобразовать квадратичные члены уравнения (3.16) введением

$$x_i^{*2} = x_i^2 - \varphi, \qquad (3.18)$$

где

$$\varphi = (2^m + 2a^2)/N. \qquad (3.19)$$

В таких планах не накладывается каких-либо ограничений на число опытов в центре плана, поэтому обычно принимают $N_0 = 1$. Для числа факторов $m = 2$ ортогональный центральный композиционный план совпадает с планом полного факторного эксперимента 3^2. Матрица планирования ортогонального центрального композиционного плана для трех факторов приведена в табл.3.6. При числе факторов $m = 3$ ортогональный центральный композиционный план имеет $N = 15$ опытов, он более экономичен, чем полный факторный эксперимент типа 3^3, число опытов которого $N = 3^3 = 27$.

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3
						Ядро
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
2	+1	−1	+1	+1	−1	−1
3	+1	+1	−1	+1	−1	+1
4	+1	−1	−1	+1	+1	−1
5	+1	+1	+1	−1	+1	−1
6	+1	−1	+1	−1	−1	+1
7	+1	+1	−1	−1	−1	−1
8	+1	−1	−1	−1	+1	+1
						"Звездные"
9	+1	+1,215	0	0	0	0
10	+1	−1,215	0	0	0	0
11	+1	0	+1,215	0	0	0
12	+1	0	−1,215	0	0	0
13	+1	0	0	+1,215	0	0
14	+1	0	0	−1,215	0	0
						Центр
15	+1	0	0	0	0	0

Таблица 3.6

x_2x_3	x_1^{*2}	x_2^{*2}	x_3^{*2}	y
плана				
+1	+0,27	+0,27	+0,27	y_1
+1	+0,27	+0,27	+0,27	y_2
−1	+0,27	+0,27	+0,27	y_3
−1	+0,27	+0,27	+0,27	y_4
−1	+0,27	+0,27	+0,27	y_5
−1	+0,27	+0,27	+0,27	y_6
+1	+0,27	+0,27	+0,27	y_7
+1	+0,27	+0,27	+0,27	y_8
точки				
0	+0,75	−0,73	−0,73	y_9
0	+0,75	−0,73	−0,73	y_{10}
0	−0,73	+0,75	−0,73	y_{11}
0	−0,73	+0,75	−0,73	y_{12}
0	−0,73	−0,73	+0,75	y_{13}
0	−0,73	−0,73	+0,75	y_{14}
плана				
0	−0,73	−0,73	−0,73	y_{15}

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3
						Ядро
1	1	1	1	1	1	1
2	−1	−1	1	1	−1	−1
3	1	1	−1	1	−1	1
4	1	−1	−1	1	1	−1
5	1	1	1	−1	1	−1
6	1	−1	1	−1	−1	1
7	1	1	−1	−1	−1	−1
8	1	−1	−1	−1	1	1
						"Звездные"
9	1	1,682	0	0	0	0
10	1	−1,682	0	0	0	0
11	1	0	1,682	0	0	0
12	1	0	−1,682	0	0	0
13	1	0	0	1,682	0	0
14	1	0	0	−1,682	0	0
						Центр
15	1	0	0	0	0	0
16	1	0	0	0	0	0
17	1	0	0	0	0	0
18	1	0	0	0	0	0
19	1	0	0	0	0	0
20	1	0	0	0	0	0

Таблица 3.7

x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	y
плана				
1	1	1	1	y_1
1	1	1	1	y_2
−1	1	1	1	y_3
−1	1	1	1	y_4
−1	1	1	1	y_5
−1	1	1	1	y_6
1	1	1	1	y_7
1	1	1	1	y_8
точки				
0	2,829	0	0	y_9
0	2,829	0	0	y_{10}
0	0	2,829	0	y_{11}
0	0	2,829	0	y_{12}
0	0	0	2,829	y_{13}
0	0	0	2,829	y_{14}
плана				
0	0	0	0	y_{15}
0	0	0	0	y_{16}
0	0	0	0	y_{17}
0	0	0	0	y_{18}
0	0	0	0	y_{19}
0	0	0	0	y_{20}

Для придания центральному композиционному плану свойства ротатабельности выбирают "звездное" плечо.

$$a = 2^{m/4}, \tag{3.20}$$

при этом ротатабельному плану можно придать свойство ортогональности, если принять число опытов в центре плана

$$N_0 = (2^m + 2a^2)/2^m - 2^{m+1}. \tag{3.21}$$

Матрица планирования ротатабельного плана для трех факторов приведена в табл.3.7.

Если имеется априорная информация об отсутствии в модели части эффектов взаимодействия, то применяют планы Хартли, в которых в качестве ядра плана используют дробную реплику 2^{m-k}. Такие планы более экономичны, чем ортогональные или ротатабельные.

Применение композиционных планов, особенно в тех случаях, когда априори неизвестны свойства объекта исследования, позволяет использовать рациональную стратегию эксперимента, которая заключается в следующем. Сначала реализуют линейный план эксперимента – ядро композиционного плана и определяют коэффициенты линейной модели. Затем проводят эксперименты в центре плана и проверяют адекватность линейной модели. Если гипотезу адекватности линейной модели отвергают, то линейный план достраивают с помощью "звездных" точек до плана второго порядка. Дальнейшее исследование проводят известными аналитическими методами на основании модели второго порядка.

Обработку результатов эксперимента и построение полиномиальной модели второго порядка осуществляют в такой же последовательности, что и при линейной модели. Однако, как уже отмечено, если план эксперимента не обладает свойством ортогональности, то для нахождения коэффициентов регрессии необходимо решать систему уравнений, используя положения метода наименьших квадратов, что иногда связано с определенными математическими трудностями.

Более подробно с рассмотренными и другими типами планов второго порядка можно познакомиться в работе [9].

Контрольные вопросы

1. Чем вызвана целесообразность применения математических методов планирования эксперимента при выполнении исследовательских работ по ЖРД?
2. Какие математические модели используют при решении задач оптимизации?
3. Что такое полный факторный эксперимент и какова методика его проведения?
4. На чем основан дробный факторный эксперимент и в чем его преимущества перед полным факторным экспериментом?
5. Какие методы быстрого увеличения целевой функции Вам известны и в чем они заключаются?
6. В каких случаях возникает необходимость использования моделей второго порядка?
7. Какие преимущества имеют композиционные планы при исследовании нелинейных моделей и как их строят?

Глава 4

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЖРД

4.1. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ, ИХ ЗВЕНЬЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

Процесс измерения параметров при испытаниях ЖРД имеет ряд особенностей, обусловленных:

большой энерговооруженностью ЖРД;

значительным диапазоном изменения измеряемых параметров;

генерацией ЖРД потока факторов, дестабилизирующих работу элементов измерительных систем, особенно первичных преобразователей информации, установленных непосредственно на его узлах;

применением криогенных и агрессивных компонентов топлива;

незначительным временем работы ЖРД в процессе испытаний;

необходимостью получения параметров с высокой статической точностью информации об установившихся значениях и о динамических процессах, характерное время которых достаточно мало.

Измерение статических значений тяги, расходов компонентов, давлений, температур, частоты вращения ротора ТНА необходимо для определения удельных параметров и дроссельных характеристик ЖРД, действительных значений КПД турбины и насосов, а также для оценки чувствительности основных параметров ЖРД к воздействию внешних факторов. Требуется высокая точность измерений статических параметров, допустимая погрешность не должна превышать нескольких десятых долей процента.

Степень устойчивости процессов в ЖРД и динамическую прочность его конструкции оценивают путем анализа результатов измерений параметров динамических процессов. При этом к системе измерения таких параметров, как пульсации давления и расхода компонентов, виброускорения, деформации элементов конструкции, предъявляют требования высокой динамической точности, что связано с недопустимостью значительных амплитудных и фазовых искажений в широкой полосе частотного спектра.

Получить высокую статическую и динамическую точность в одном канале измерения практически не удается. В связи с этим средства

измерения основных параметров ЖРД делят на две группы: измерительные системы для статических – установившихся и для динамических – переходных процессов. Деление это условно, поскольку четкую границу между группами провести довольно сложно.

Измерительные устройства, применяемые при испытаниях ЖРД, – это сложные системы, содержащие механические, электрические, магнитные, пневматические или гидравлические звенья. Одно или несколько звеньев образуют чувствительный элемент первичного преобразователя. Регистрирующий элемент, предназначенный для фиксации измеряемой величины, является конечным звеном измерительной цепи. Между первичным преобразователем и регистрирующим элементом расположены промежуточные звенья, осуществляющие преобразование, усиление, сравнение и передачу сигналов. При этом неизбежны искажения, определяемые статическими или динамическими характеристиками всех звеньев системы. Физические зависимости, проявляющиеся в отдельных элементах измерительной цепи, весьма разнообразны. Так, в статическом режиме измерения в уравнении связи входного x и выходного y сигналов

$$y = Kx \qquad (4.1)$$

статический коэффициент усиления K в линейной системе измерения постоянный (рис.4.1, *а*), в нелинейной – переменный, зависящий от значения x (рис.4.1, *б*), а в системе с гистерезисом – зависящий от направления изменения x (рис.4.1, *в*). В основном статические свойства измерительных систем отражают линейными моделями, а возможные отклонения от закона K = const учитывают при расчете погрешности. Динамические свойства звеньев определяются их передаточными функциями, вид которых зависит от характера связи входного (x) и выходного (y) сигналов.

Рассмотрим основные типы звеньев, применяемых в измерительных системах.

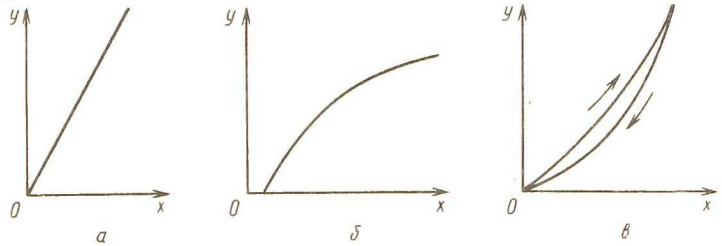


Рис.4.1. Статические характеристики систем:
***а* – линейной; *б* – нелинейной; *в* – с гистерезисом**

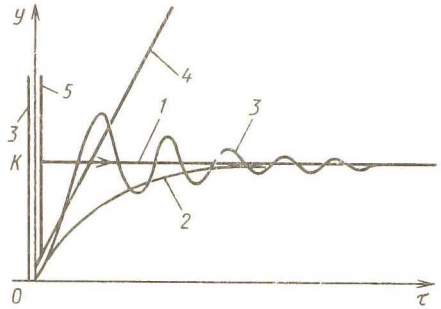




Рис. 4.2. Графики переходных функций типовых звеньев:
1 — статического усилительного; 2 — апериодического; 3 — колебательного; 4 — идеального интегрирующего; 5 — идеального дифференцирующего

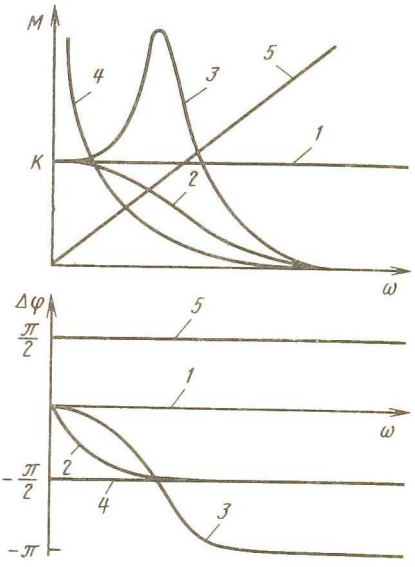


Рис. 4.3. Частотные характеристики типовых звеньев:
M — отношение амплитуд выходного и входного сигналов при x $1\sin\omega\tau$; $\Delta\varphi$ — сдвиг фаз между выходным и входным сигналами. Позиции 1, ..., 5 см. в подписи к рис. 4.2.

1. Статическое усилительное (пропорциональное) звено находит применение в рычажном динамометре, электронном усилителе и т.д. Уравнение связи между x и y имеет вид

$$y = K_y x, \tag{4.2}$$

а передаточная функция — $W_y = \tilde{y}/\tilde{x} = K_y$, где $\tilde{x}$, $\tilde{y}$ — изображения по Лапласу входного и выходного сигналов.

Здесь K_y — коэффициент усиления звена, он может быть выражен любым действительным числом. Согласно динамическим характеристикам рассматриваемого звена (рис.4.2 и 4.3) оно не обладает динамической погрешностью, т.е. выходной сигнал безынерционно следует за входным. Значение выходного сигнала изменяется в K_y раз.

2. Апериодическое (инерционное) звено имеет уравнение связи между x и y

$$T\frac{dy}{d\tau} + y = K_{ап}x \qquad (4.3)$$

и передаточную функцию $W_{ап} = K_{ап}/(Ts + 1)$. Здесь T – постоянная времени звена – его основная характеристика, полностью определяющая количественные искажения сигнала в звене как в функции времени τ (переходная функция), так и в функции частоты ω (частотные характеристики); $K_{ап}$ – коэффициент усиления апериодического звена; s – оператор Лапласа.

Решение уравнения (4.3) в области времени при $x = 1(\tau)$ – единичном ступенчатом возмущении – имеет вид

$$y = K_{ап}(1 - e^{-\tau/T}). \qquad (4.4)$$

Полученное решение является экспоненциальной функцией, ордината графика которой асимптотически приближается к $K_{ап}x$ при $\tau \to \infty$ (см. рис.4.2). С уменьшением T инерция звена уменьшается, а с увеличением T динамические искажения становятся более заметными. Частотные характеристики звена определяются свойствами частотной функции $\Phi_{ап}(i\omega)$, получаемой из выражения для передаточной функции $W(s)$ подстановкой $s = i\omega$, где ω – угловая частота, т.е.

$$\Phi_{ап} = K_{ап}/(Ti\omega + 1). \qquad (4.5)$$

При изменении ω от 0 до ∞ этой функции соответствует годограф в виде полуокружности, расположенной в первой четверти комплексной плоскости. Он полностью определяет амплитудные и фазовые искажения в звене в зависимости от T и ω. Обычно эти искажения представляют в виде амплитудной и фазовой частотных характеристик (см. рис.4.3). Примерами апериодических звеньев измерительной цепи являются крыльчатки турбинных расходомеров, термопары, электрические фильтры во вторичных преобразователях.

3. Колебательное звено имеет уравнение

$$T_2^2\frac{d^2y}{d\tau^2} + T_1\frac{dy}{d\tau} + y = K_{кол}x \qquad (4.6)$$

и передаточную функцию

$$W_{кол} = K_{кол}/(T_2^2 s^2 + T_1 s + 1).$$

Здесь индексом "кол" обозначены параметры колебательного звена. В зависимости от соотношения между коэффициентами T_1 и T_2^2 в уравнении звена переходная функция характеризуется различной степенью затухания колебаний. Критическое демпфирование звена определяется соотношением $T_1 = 2T_2$. Если $T_1 \geq 2T_2$, колебания в переходной функции не проявляются, а частотная функция теряет резонанс. Если $T_1 < 2T_2$, картина качественно меняется. Переходная функция становится осциллирующей, резонанс – более выраженным. С уменьшением коэффициента демпфирования звена (с уменьшением T_1) резонансная частота приближается к своему предельному значению – собственной частоте $\omega_c = 1/T_2$, а модуль амплитудной частотной характеристики возрастает в пределе ($T_1 = 0$) до бесконечно большого значения, что в реальной системе недостижимо. Примерами колебательных звеньев в измерительных системах являются мембраны и струны преобразователей давления, гальванометры шлейфовых осциллографов.

4. Идеальное интегрирующее звено имеет уравнение связи между x и y

$$y = \frac{K_и}{T} \int x d\tau \qquad (4.7)$$

и передаточную функцию

$$W_и = K_и/(Ts).$$

Здесь индексом "и" обозначены параметры интегрирующего звена. В данном звене выходная величина пропорциональна интегралу от входной по времени.

Иногда в процессе интегрирования проявляются инерционные искажения (реальное интегрирование). В этом случае суммарные динамические свойства могут быть определены как свойства соединения звеньев – идеального интегрирующего и апериодического. Интегрирующие звенья позволяют определить суммарный расход компонента за некото-

рый промежуток времени, угол поворота управляющего органа, значение виброскорости и виброперемещения.

5. Идеальное дифференцирующее звено имеет уравнение связи между x и y

$$y = K_{\text{диф}} T \frac{dx}{d\tau} \tag{4.8}$$

и передаточную функцию

$$W_{\text{диф}} = K_{\text{диф}} Ts.$$

Здесь индексом "диф" обозначены параметры дифференцирующего звена. На практике такие идеальные дифференцирующие звенья не встречаются. Дифференцирующие свойства измерительной цепи, как правило, связаны с инерционными искажениями, т.е. передаточная функция преобразуется до вида передаточной функции реального дифференцирующего звена

$$W_{\text{р.диф}} = K_{\text{диф}} Ts/(Ts + 1). \tag{4.9}$$

Такими свойствами обладают элементы измерительных цепей с вибропреобразователями и некоторые типы фильтров.

Из изложенного следует, что при измерении статических параметров усилительное, апериодическое и колебательное звенья систем не отличаются друг от друга. Различие в их характеристиках появляется только при измерении параметров нестанционарных процессов. Несколько особое место занимают интегрирующее и дифференцирующее звенья.

Рассмотренным типам звеньев соответствуют динамические характеристики. Они качественно отличаются друг от друга (см. рис.4.2 и 4.3), а количественные показатели характеристик зависят от численных значений коэффициентов усиления и динамических коэффициентов звеньев. Оценивая динамические свойства измерительной системы, необходимо учитывать характеристику каждого звена, а также вид их соединения.

4.2. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

4.2.1. Измерение давления

Большинство задач, решаемых при испытаниях ЖРД, требует измерения давлений в узлах и магистралях ДУ. Это прежде всего связано с необходимостью получения информации о параметрах статического режима, определяемого: давлением газов в камере сгорания и газогенераторе, напорами насосов ТНА, перепадами давлений в трактах ЖРД.

При имитации высотных условий работы ЖРД требуется точное определение степени разрежения в зоне среза сопла; при проверке действительных кавитационных запасов – давлений на входе в насосы. Так как работа ЖРД сопровождается значительными динамическими нагрузками, необходимо точное измерение значений давлений в момент гидроудара и "провала" давления на входах в насосы, определение темпов нарастания и уменьшения давлений в энергоузлах, пульсаций давления в камере сгорания и т.д.

Таким образом, в практике испытаний ЖРД кроме измерений установившихся давлений приходится иметь дело с измерением переменных, в том числе быстроменяющихся давлений. Определенные в процессе испытаний значения медленноменяющихся давлений служат критериями оценки основных параметров ЖРД или систем. Пульсации измеряют для оценки устойчивости рабочего процесса.

Рассмотрим основные характеристики и особенности устройств, предназначенных для измерения установившихся давлений в узлах и магистралях ДУ. К ним, в первую очередь, необходимо отнести механический преобразователь давления (манометр), в котором деформация упругого элемента под действием давления преобразуется в угловое перемещение стрелочного указателя.

Особенности конструкции манометра обусловливают необходимость выполнения ряда обязательных мер по защите их от действия вибраций, переменных температур, пульсаций давления. Поэтому манометры на испытательных стендах устанавливают в специальных отсеках, удаленных от испытываемого объекта, а с двигательными системами их соединяют с помощью достаточно сложной трубопроводной схемы (рис.4.4). Применение таких схем подвода давления к измерителям вызывает необходимость учета систематической погрешности, возникающей из-за разности в уровнях точки отбора давления и установки манометра $H_{г.ст}$ (гидростатический эффект). Действи-

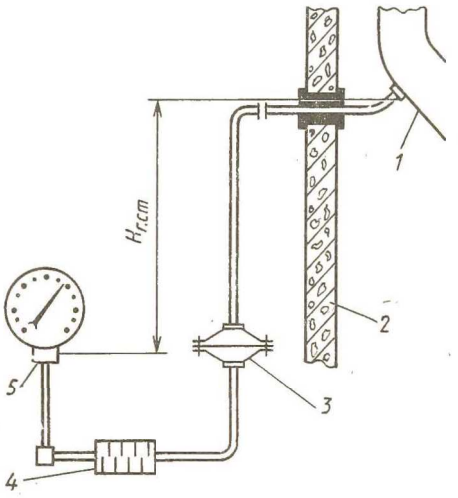


Рис.4.4. Схема установки манометра на испытательном стенде: 1 – магистраль ЖРД; 2 – стена огневого отсека; 3 – разделитель; 4 – демпфер; 5 – манометр

тельный результат измерения в этом случае

$$p_д = p_{изм} - H_{г.ст}\rho g, \quad (4.10)$$

где $p_{изм}$ – измеренное давление; ρ – плотность вещества, заполняющего магистраль; g – ускорение свободного падения.

Чтобы предотвратить значительные колебания рабочего тела в магистрали, следует внимательно подойти к выбору способа и параметров демпфирования линии передачи давления. При соблюдении надежной защиты манометра от действия дестабилизирующих факторов может быть обеспечена погрешность измерения, соответствующая его классу точности. У манометров, применяемых при испытаниях ЖРД, класс точности 0,5 и 1,0. Для уменьшения погрешности иногда в самых ответственных местах устанавливается до трех приборов.

К недостаткам измерения установившихся давлений манометрами следует отнести технологическую сложность подготовки измерительной системы, а также трудность автоматизации процесса измерения. В связи с этим более перспективно применение точных электрических преобразователей давления, среди которых следует отметить вибрационно-частотный и потенциометрический (реостатный).

В вибрационно-частотном первичном преобразователе давления типа ДДВ давление в полости под мембраной 6 (рис.4.5), деформирует ее, изменяя натяжение перемычки 4, выполненной как одно целое с мембраной. Электромагнитная система, состоящая из элементов 3 и 5, совместно с усилителем 2 образует генератор с выходным сигналом – частотой колебаний, изменяющейся в зависимости от давления. Девиация частоты составляет 25...35 % в диапазоне измерения. Погрешность преобразователя – не более ±0,25 % $p_{ном}$.

Вибрационно-частотные преобразователи обладают высокой чувствительностью к изменениям внешних факторов (температуры, вибраци-

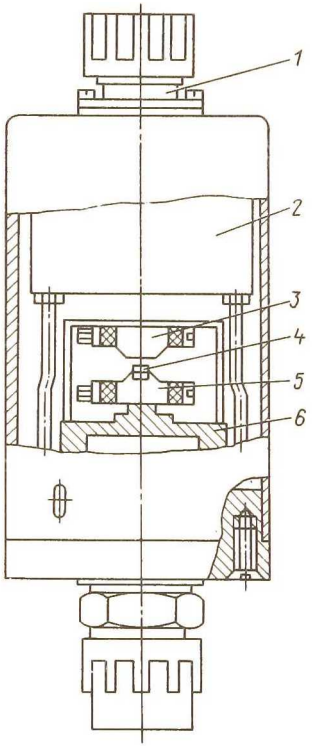


Рис.4.5. Принципиальная схема вибрационно-частотного первичного преобразователя давления типа ДДВ:
1 – разъем штепсельный; 2 – усилитель; 3,5 – элементы электромагнитной системы; 4 – перемычка; 6 – мембрана

онного нагружения и т.п.), поэтому схемы их установки на стендах такие же, как схемы установки манометров. Учитывая высокую статическую точность вибрационно-частотных преобразователей и возможность включения их в систему автоматической обработки результатов испытаний, им часто отдают предпочтение перед механическими манометрами. Наличие протяженной магистрали подвода давления к вибрационно-частотным преобразователям, включающей разделительные устройства и демпферы, затрудняет использование получаемой информации для анализа переходных процессов в ЖРД.

При испытаниях ЖРД часто используют потенциометрические преобразователи давления типа ДТ, МД, МДД, ДТМ и др. Несмотря на некоторые конструктивные отличия, принцип их работы аналогичен и основан на преобразовании изменения давления в перемещение упругого чувствительного элемента (сильфона, мембраны, и т.п.), связанного с ползунком реостата. В потенциометрическом преобразователе давления (рис.4.6) измеряемое давление $p_{изм}$ через демпфер 6, защищающий преобразователь от повышенных пульсаций, передается на мембрану 1, являющуюся чувствительным элементом. Ее деформация под действием давления через механическую систему, включающую шток 2 и рычаг 3, передается на щеткодержатель 4, при этом контакт 5 меняет свое положение на реостате.

Из существующих преобразователей давления потенциометрические имеют наиболее простую электрическую схему, не требуют последующего усиления сигнала или его преобразования. Выходной сигнал $U_{вых}$ потенциометрического преобразователя изменяется в соответствии с

изменением относительного сопротивления dR/R, где R – омическое сопротивление. Перемещение ползунка реостата преобразуется в напряжение постоянного тока, при этом напряжение меняется от U_{min} = = 0 до U_{max} = 6...15 В и зависит от напряжения питания $U_{пит}$. Диапазоны измерения охватывают давления от сотен паскалей (преобразователь типа МДД) до десятков мегапаскалей (преобразователи типа МД, ДТ).

Потенциометрические преобразователи обеспечивают измерение при установившемся процессе с погрешностью ±0,8 % $p_{ном}$ (преобразователи типа ДТМ и ДТ) и ±1,5...3 % $p_{ном}$ (преобразователи типа МДД и МД). Такая точность достигается при обеспечении достаточно надежной защиты потенциометрических преобразователей давления от действия таких дестабилизирующих факторов, как высокая температура измеряемой среды, вибрационные и ударные нагрузки, пульсации давления.

При установке преобразователя давления 4 на двигателе 1 (рис.4.7) трубопровод 2 выполняет функции защиты чувствительного элемента преобразователя от температурных воздействий и вибрационных нагружений. Гидравлический демпфер 3 защищает чувствительный элемент от пульсаций давления. Обычно он выполнен в виде гидравлического дросселя или вставки из пористого материала. Высокую эффективность защиты чувствительного элемента от воздействия пуль-

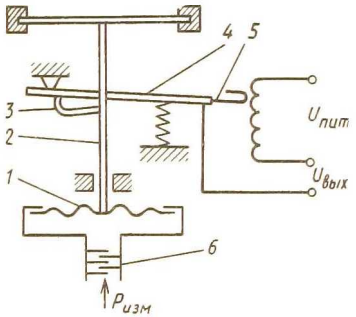


Рис.4.6. Принципиальная схема потенциометрического преобразователя давления:
1 – мембрана; 2 – шток; 3 – рычаг; 4 – щеткодержатель; 5 – контакт; 6 – демпфер

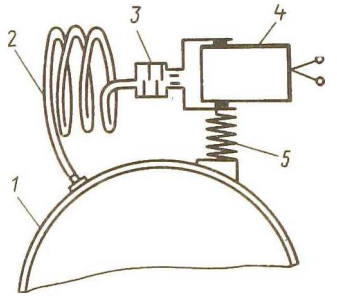


Рис.4.7. Схема установки преобразователя давления на двигателе:
1 – двигатель; 2 – трубопровод; 3 – демпфер; 4 – преобразователь давления; 5 – амортизатор

саций обеспечивает трубопровод с небольшим внутренним диаметром. В качестве амортизаторов 5 можно применять различный упругий материал, но наилучшими эксплуатационными качествами и наибольшей эффективностью обладают амортизаторы, изготовленные из металлорезины. Частотные характеристики канала трубопровода (рис.4.8, *а*) и системы амортизации (рис.4.8, *б*) потенциометрического преобразователя позволяют оценить эффективность гидравлического и вибрационного демпфирования с использованием пористого наполнителя трубопровода и амортизатора из металлорезины. Применение защитных устройств такого типа значительно повышает надежность работы преобразователей при испытании двигателя и точность получаемой информации.

Анализ динамических процессов по результатам измерения давления потенциометрическими преобразователями весьма затруднен из-за возможности значительных динамических искажений в системе трубопровод – преобразователь, особенно при измерении малых давлений жидких компонентов. Они могут привести к качественным ошибкам при анализе динамического состояния двигателя. Как видно по осциллограммам (рис.4.9) переходных процессов, параметры которых зарегистрированы потенциометрическим преобразователем, подвод давления к которому осуществлялся по трубопроводу, и эталонным преобразователем, установленным непосредственно на магистрали двигателя, отклонения давления весьма велики.

Для получения информации о процессах, происходящих в двигателе, используют преобразователи давления, конструктивные схемы и принцип преобразования давления в электрическую величину которых позволяют устанавливать их непосредственно в магистраль или узел дви-

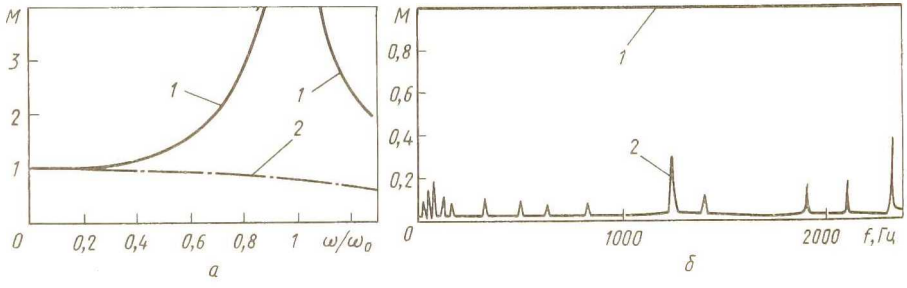


Рис.4.8. Частотные характеристики канала трубопровода (*а*) и системы амортизации (*б*):
1 – система (канал) исходная; 2 – система (канал) с демпфированием; *M* – модуль амплитудной частотной характеристики

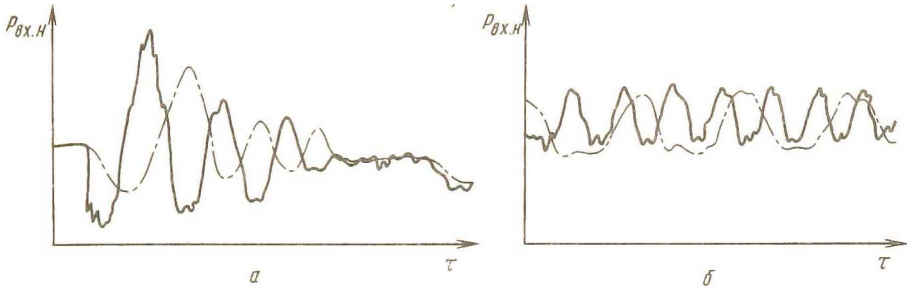


Рис.4.9. Графики изменения давления $p_{вх.н}$ на входе в насос двигателя при запуске двигателя ($а$) и на установившемся режиме ($б$): —— преобразователь эталонный; – · – ДТМ с трубопроводом

гателя. При этом преобразователь должен обладать высокой вибростойкостью, нечувствительностью к ударным воздействиям и изменению температуры. Такой преобразователь не измеряет среднее значение давления с высокой точностью, но, так как при его использовании из схемы измерения исключается переходное звено – трубопровод с гидравлическим демпфером, значительно повышается динамическая точность измерения.

При испытании ЖРД наиболее часто используют также быстродействующие индуктивные и тензометрические преобразователи.

Принцип работы индуктивных преобразователей давления основан на изменении магнитного сопротивления переменного зазора δ в зависимости от силы, действующей на мембрану (рис.4.10). Рабочим диапазоном преобразователя считают пределы изменения давления, при которых мембрана работает в области упругих деформаций, а магнитная система не насыщается.

Индуктивный преобразователь ДД-10 (рис.4.11) позволяет измерять давление до 30 МПа. Собственная частота колебаний мембраны примерно 20 кГц. Электрическая схема преобразователя выполнена в виде полумоста с двумя катушками – рабочей и компенсационной. Использование этой схемы позволяет уменьшить температурную погрешность. Питание схемы осуществляется напряжением с несущей частотой 10 кГц. Дальнейшее ее увеличение ограничивается повышением гистерезиса в материале сердечника. Указанная несущая частота обеспечивает возможность измерения давления в частотном диапазоне до 1000 Гц. При этом разность в показаниях при прямом и обратном ходе градуировки менее 2 %. Полная температурная компенсация обеспечивается при изменении температуры в пределах ±50 °С.

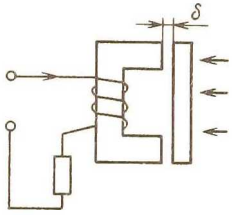


Рис. 4.10. Принципиальная схема индуктивного преобразователя давления

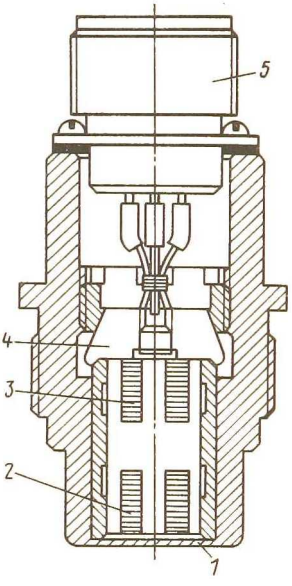


Рис. 4.11. Принципиальная схема индуктивного преобразователя давления ДД-10:
1 – мембрана; 2 – катушка рабочая; 3 – катушка компенсационная; 4 – муфта компенсационная; 5 – разъем штепсельный

Такой же принцип преобразования давления использован и в индуктивных преобразователях типа ДДИ-20, ДДИ-21, ДИ. От преобразователя ДД-10 они отличаются в основном конструктивным оформлением и параметрами электрической схемы.

Принцип работы тензометрических преобразователей давления основан на преобразовании механической деформации растяжения или сжатия упругих элементов в изменение омического сопротивления проволочных тензометров, установленных на них. Тензометры обычно выполняют в виде двух тонких эластичных пластин из изоляционного материала, между которыми расположен проволочный тензочувствительный элемент (рис.4.12). Размер A называют базой тензометра. Она в зависимости от конструкции преобразователя составляет от 1,5 до 100 мм; номинальное сопротивление – от 10 до 1000 Ом. Основным параметром тензометра является тензочувствительность k_s, определяемая выражением

$$k_s = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = E\,\frac{\Delta R/R}{\sigma}\,, \qquad (4.11)$$

где R и l – омическое сопротивление и длина проводника; ΔR и Δl – изменение омического сопротивления и длины проводника при деформации; E – модуль упругости материала тензометра; σ – механическое напряжение в материале.

Тензочувствительность проволочных металлических тензометров лежит в пределах 2...6. Наибольшее распространение в качестве материала для тензометров получил константан (k_s = 2). Тензометры крепят к чувствительным элементам преобразователей давления клеем или точечной сваркой. Электрически их обычно объединяют в дифференциальную мостовую схему (рис.4.13), что позволяет увеличить чувствительность преобразователя. Питание схемы может быть осуществлено как постоянным, так и переменным током.

Тензометрический преобразователь давления типа ДДТ (рис.4.14,*а*) предназначен для измерения давлений до 16 МПа в температурном диапазоне – 176...+140 °С с погрешностью не выше ±3 % $p_{ном}$. Тензометрический преобразователь ДДТА (рис.4.14, *б*) имеет систему водяного охлаждения узла чувствительного элемента, что позволяет измерять давления при температуре рабочего тела до 3000 °С. Высокая вибростойкость тензометрических преобразователей давления позволяет устанавливать их непосредственно на узел двигателя, исключая тем самым динамические искажения в соединительных трубопроводах.

Как индуктивные, так и тензометрические преобразователи давления используют для определения параметров быстропеременных процессов при запуске и выключении двигателя, параметров колебаний давления при работе на установившемся режиме. Пульсации давления до частоты 15 кГц можно измерять также с помощью пьезоэлектрических или емкостных преобразователей переменного давления с погрешностью 7...30 %. Однако в практике испытаний ЖРД применение пьезоэлектрических и емкостных преобразователей ограничено из-за низкой вибро-

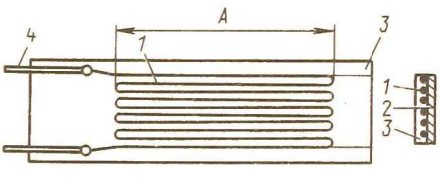


Рис.4.12. Конструкция проволочных тензометров:
1 – проволока; 2 – подложка из бумаги или лаковой пленки; 3 – покрытие из бумаги, фетра или лака; 4 – выводы

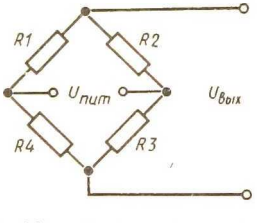


Рис.4.13. Мостовая схема включения тензометров:
$R1, \ldots, R4$ – сопротивления тензометров; $U_{пит}$, $U_{вых}$ – напряжение питания и напряжение на выходе

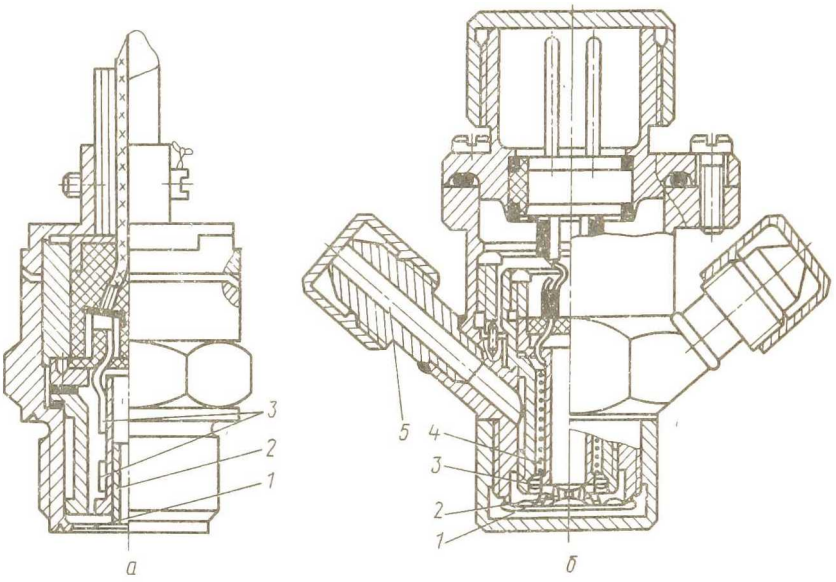


Рис. 4.14. Конструктивные схемы тензометрических преобразователей давления:

а — вариант неохлаждаемый: 1 — мембрана; 2 — элемент упругий; 3 — тензометр; *б* — вариант охлаждаемый:

1 — мембрана; 2 — проставка, 3 — стакан; 4 — элемент чувствительный с тензометрами; 5 — штуцер для подвода воды

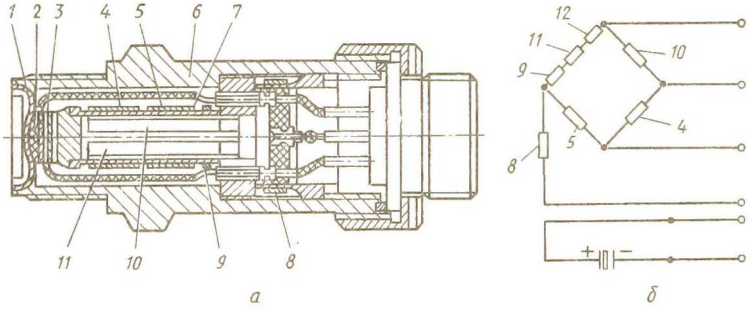


Рис. 4.15. Схема совмещенного преобразователя давления и пульсаций давления (*а*) и схема моста (*б*):

1 — мембрана; 2 — пластина керамическая; 3 — пьезоэлемент; 4, 5, 10, 11 — тензометры; 6 — корпус преобразователя; 7 — стакан; 8 — резистор для коррекции нуля тензометрического преобразователя; 9 — резистор для температурной коррекции чувствительности; 12 — резистор для уравновешивания моста

стойкости, значительной чувствительности к ударным нагрузкам и изменениям параметров окружающей среды (температуры, влажности).

Весьма перспективна при испытаниях ЖРД схема совмещенного преобразователя, включающая тензометрическую систему измерения давления и пьезоэлектрический преобразователь переменного давления и пульсаций давления (рис.4.15). Тензометры 11, 10, 4 и 5, включенные по электрической дифференциальной схеме моста, наклеиваются на внутреннюю и внешнюю поверхности стакана 7, а непосредственно под мембраной 1 находится пьезоэлемент 3, изолированный от стакана и мембраны керамическими пластинами 2. Каждый из измерительных элементов имеет индивидуальные выводы на штепсельный разъем. Для температурной коррекции нуля тензометрического преобразователя используют резистор 9, размещенный на стакане, а для температурной коррекции чувствительности – резистор 8, расположенный в корпусе 6 преобразователя. Для начального уравновешивания моста используют резистор 12 (сопротивления резисторов 9, 8, 12 подбирают экспериментально при настройке преобразователя). Погрешность измерения давления ±0,8 %, пульсаций ±10 %. Температурный диапазон преобразователя находится в пределах от +50 до –196 °С, максимальная частота пульсаций равна 4000 Гц. Пределы измерения давления определяются геометрией стакана и мембраны и достигают 10...50 МПа.

К достоинствам индуктивных и тензометрических преобразователей следует отнести удобство калибровки измерительного канала, которая может быть осуществлена до и после испытания автоматически путем подключения к схеме преобразователя калибровочного элемента – катушки индуктивности или резистора, разбаланс электрической измерительной схемы от которых заранее определен путем сравнения с эталонным действующим давлением.

4.2.2. Измерение температуры

При проведении испытаний ЖРД возникает необходимость измерения температуры компонентов в баках, магистралях стенда и двигателя, в газогенераторах и газоводах, в узле турбины ТНА, на поверхности элементов двигателя, а также температуры окружающей среды. Результаты измерения необходимы для оценки энергетического состояния двигателя, учета действия внешних факторов при определении точности его настройки на заданный режим, оценки надежности элементов конструкции.

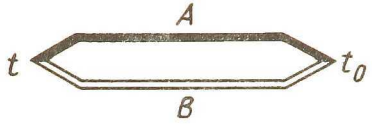


Рис. 4.16. Термометрическая цепь

При отработке нового двигателя иногда приходится измерять температуру газов в камере сгорания и в факеле пламени.

Измерять температуру можно при непосредственном контакте чувствительного элемента со средой или поверхностью. По этому принципу работают объемные термометры, для которых характерна зависимость $V = f(t)$, где V – объем чувствительного элемента; t – температура, манометрические термометры, для которых характерна зависимость $p = f(t)$, терморезисторные термометры – термометры сопротивления, для которых характерна зависимость $R = f(t)$, термоэлектрические термометры – термометры, для которых характерна зависимость $E = f(t)$, где E – термоЭДС, развиваемая термопарой.

Другой способ измерения температур не требует контакта. По такому принципу работают оптические пирометры. Они необходимы для исследования процессов, происходящих в камерах двигателей и газогенераторах.

Из приборов, работающих по первому способу, при испытании ЖРД повсеместно применяют термопары и термометры сопротивления.

Принцип работы термопары основан на возникновении в цепи, составленной из двух разнородных проводников – термоэлектродов A и B (рис.4.16), электрического тока, если места соединения этих термоэлектродов – спаи имеют разную температуру. ТермоЭДС, вызывающая ток, зависит только от разности температур спаев t и t_0. Если один спай термопары, называемый рабочим (горячий спай), поместить в среду, температуру которой измеряют, а другой спай, называемый свободным (холодный спай), поместить в среду с температурой тающего льда (0 °С), то можно в принципе определить температуру среды, в которой находится рабочий спай.

Для того чтобы оценить значение температуры в зоне горячего спая, необходимо измерить термоЭДС в цепи. С этой целью свободный

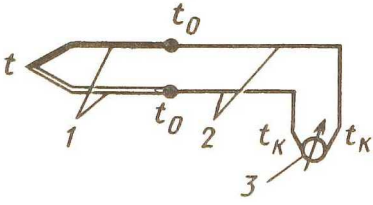
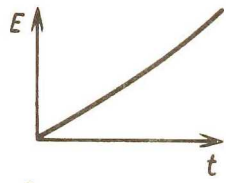


Рис. 4.17. Схема включения электрического прибора в термоэлектрическую цепь:
1 – конец термопары свободный; 2 – провод; 3 – клеммы гальванометра

Рис. 4.18. Градуировочная характеристика термопары



конец 1 термопары (рис.4.17) переносят на клеммы 3 гальванометра или соединяют с ними проводом 2, обеспечивающим необходимую дистанционность измерений.

До начала измерений снимают градуировочную характеристику термопары (рис.4.18). В процессе проведения этой операции температуру холодного спая сохраняют постоянной и равной 0 °С, а рабочий спай последовательно нагревают до различных известных температур и определяют развиваемую в термопаре термоЭДС в милливольтах.

Работа термопары и пределы измеряемых температур в значительной степени зависят от материалов термоэлектродов. К ним предъявляют следующие требования:

термоЭДС при повышении температуры должна увеличиваться (желательно линейно);

значение термоЭДС должно быть достаточно большим;

коэффициент электросопротивления должен быть минимальным при высокой электропроводности;

физико-химические свойства их не должны изменяться в условиях нормальной эксплуатации;

материалы, из которых изготовлены термоэлектроды, должны быть достаточно однородными и устойчивыми к коррозии;

температура плавления должна заметно превышать измеряемую.

С учетом перечисленных требований при испытаниях ЖРД находят применение термопары из различных термоэлектродных материалов, выбор которых определяется областью применения приемников, т.е. температурой и средой, в которой выполняются измерения. Наиболее часто используемые термопары и области их применения таковы:

Термопара	*Область применения, °С*
Вольфрам – молибден	до 2600
Иридий – иридиородий	до 2000
Платина – платинородий	до 1600
Хромель – алюмель	200...1300
Хромель – копель	200...800
Медь – константан	–250...350

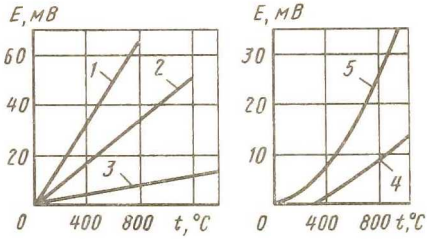


Рис. 4.19. Характеристики термопар:
1 – хромель-копелевой; 2 – хромель-алюмелевой; 3 – платино-платинородиевой; 4 – НК–СА; 5 – НЖ–СК

Кроме перечисленных, в практике испытаний находят применение термопары НК–СА (один термоэлектрод изготовлен из никель – кобальтового сплава, другой – из специального алюмеля) и НЖ–СК (один термоэлектрод из железоникелевого сплава, другой – из специального копеля).

Анализ характеристик некоторых наиболее употребительных термопар (рис.4.19) показывает, что платино-платинородиевая термопара более теплостойка, но обладает меньшей чувствительностью. Недостатком является и ее высокая стоимость. Характеристики термопар НК–СА и НЖ–СК имеют в начальном температурном диапазоне зону нечувствительности. Так, у термопары НК–СА термоЭДС возникает только при температурах, превышающих 300 °С, а у термопары НЖ–СК – при температурах, превышающих 100 °С. Благодаря этой особенности изменение температуры холодных спаев (в связи с колебаниями температуры окружающего воздуха) не оказывает влияния на термоЭДС, которая определяется только измеряемой температурой горячего спая. При использовании других типов термопар приходится компенсировать погрешности, вызываемые изменением температуры холодных спаев.

При испытаниях ЖРД, работающих на криогенных компонентах, обычно необходимо контролировать отрицательные температуры рабочего тела в магистралях и баках. Для этой цели успешно применяют медно-константановую термопару, обладающую высокой чувствительностью в нужной области измерения (рис.4.20).

С помощью термопар можно измерять непосредственно разность температур в различных точках среды или перепад температур в конст-

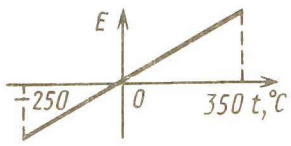


Рис. 4.20. Характеристика медно-константановой термопары

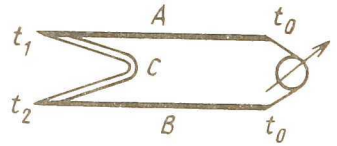


Рис. 4.21. Дифференциальная термопара

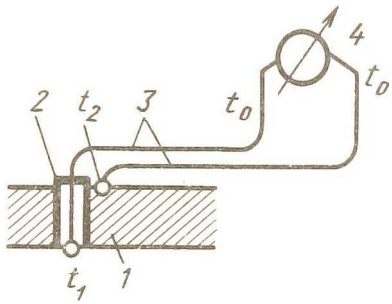


Рис. 4.22. Схема определения градиента температур на стенке камеры сгорания:
1 – камера сгорания; 2 – трубка кварцевая; 3 – термоэлектрод; 4 – милливольтметр

рукции для оценки, например, эффективности охлаждения. В этом случае используют дифференциальную термопару (рис.4.21). Ее изготавливают из трех термоэлектродов (причем два из них – *A* и *B* – из одного материала, а третий – *C* – из другого). Можно показать, что термоЭДС термопары зависит только от разности температур спаев t_1 и t_2:

$$E = f\left[(t_1 - t_0) - (t_2 - t_0)\right]. \qquad (4.12)$$

Дифференциальную термопару часто применяют для измерения градиента температур на стенке камеры сгорания. При этом третьим электродом может быть материал самой камеры 1 (рис.4.22). Термоэлектроды 3 изолируют от стенки кварцевой трубкой 2. Горячие спаи, температура которых t_1 и t_2, приваривают к стенке. Температура холодного спая t_0 может не равняться 0°С. Милливольтметр 4 показывает значение термоЭДС: $E = f(t_1 - t_2)$.

Для более точного определения температуры поверхности важно обеспечить хороший контакт между деталью и термопарой и предотвратить отвод теплоты по термоэлектродам от места измерения температуры. С этой целью горячий спай термопары необходимо приварить непосредственно к детали или лучше – через тонкую пластинку из материала с хорошей теплопроводностью (медь, серебро). Это улучшает

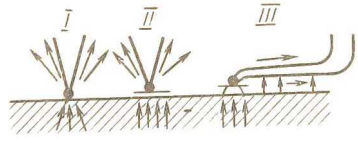


Рис. 4.23. Схемы измерения температуры поверхности

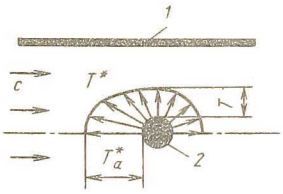


Рис.4.24. Схема торможения газового потока у горячего спая термопары:
1 – магистраль стендовая; 2 – приемник

теплоподвод к горячему спаю и уменьшает теплоотвод от нагретой поверхности. На рис.4.23 представлены три схемы измерения температуры поверхности. При способе измерения I имеет место интенсивный теплоотвод от поверхности, в зоне контакта температура поверхности ниже, чем в других местах. Уменьшение этого эффекта обеспечивает способ II. Лучшим является способ III, обеспечивающий получение наиболее высокой точности измерения.

При испытаниях приходится измерять температуру движущихся потоков жидкостей и газов. Жидкости движутся обычно с небольшими скоростями, при которых можно считать температуру недвижущейся и движущейся жидкости одинаковой. Измерять температуру потоков, движущихся с малой скоростью $c < 50$ м/с, достаточно просто.

Газы в стендовых магистралях 1 (рис.4.24) и в элементах ЖРД движутся обычно с большими скоростями. Установка приемника 2 в поток вызывает торможение газа и повышение температуры приемника. Температура адиабатно заторможенного потока

$$T_a^* = T + c^2/(2c_p), \qquad (4.13)$$

где T – установившаяся температура потока.

В действительности всегда имеет место неполное торможение и, кроме того, теплообмен с окружающей средой за счет лучистого теплообмена и теплопроводности материала первичного преобразователя, т.е. $T^* < T_a^*$,

$$T_д^* = T + zc^2/(2c_p), \qquad (4.14)$$

где $T_д^*$ – действительная температура; $z = (T^* - T)/(T_a^* - T)$ – коэффициент восстановления температуры.

Термопара, поставленная в поток, передает теплоту окружающим ее стенкам канала, имеющим более низкую температуру, вследствие чего ее температура становится ниже температуры омывающих ее газов. Если между каналом 1 (рис.4.25) и термопарой 2 поставить экран 3, то

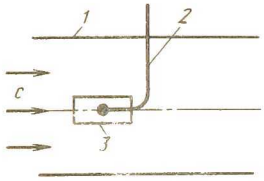


Рис. 4.25. Термопара с экраном:
1 — канал; 2 — термопара; 3 — экран

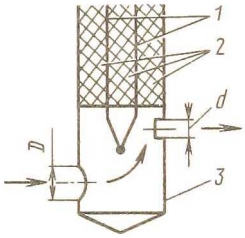


Рис. 4.26. Схема вертикального термоприемника:
1 — термопара; 2 — теплоизоляция; 3 — камера торможения

температура экрана будет выше температуры охлаждаемой стенки канала, что приведет к снижению потерь теплоты термопарой.

Уменьшить погрешность измерения можно, теплоизолируя термоэлектроды термопары и устраивая вокруг горячего спая камеру торможения для приближения T^* к T^*_a. На рис. 4.26 представлена схема вертикального термоприемника с камерой торможения и теплоизоляцией. Обычно отношение диаметров на выходе d и на входе D у камер торможения рассматриваемого типа 1/2...1/4.

Температуру сверхзвуковых потоков измеряют специально спрофилированными горизонтальными термоприемниками.

Инерция термопар зависит от сечения термоэлектродов, размера и формы головки горячего спая, конструкции экрана. Постоянная времени термопар изменяется от долей секунды до нескольких секунд. По-



Рис. 4.27. Конструкция термоприемника:
1 — отверстие приемное; 2 — термопара; 3 — трубка; 4 — трубка керамическая; 5 — штифт установочный; 6 — гайка; 7 — корпус; 8 — колодка керамическая; 9 — гайка; 10 — шланг гибкий; 11 — контакт; 12 — отверстие выходное

грешность измерения температуры рассматриваемыми приборами зависит от многих факторов и может составлять ±2... ±5 %. Типовая конструкция термоприемника для измерения газовых потоков приведена на рис.4.27.

Когда необходимо высокоточное определение температуры компонентов в баках, жидких и газообразных рабочих тел в различных объектах, температуры окружающей среды, предпочтение следует отдать термометрам сопротивления. Принцип действия термометров сопротивления основан на свойстве металлов и сплавов изменять свое электрическое сопротивление при изменении температуры. Обычно эта зависимость достаточно точно и в довольно большом диапазоне изменения температуры аппроксимируется уравнением прямой

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \qquad (4.15)$$

где α – коэффициент температурной чувствительности; R_0 – сопротивление при начальной температуре.

Чувствительный элемент, сопротивление которого R_t меняется в зависимости от температуры, включают в уравновешенный мост (рис.4.28). Изменение R_t приводит к нарушению равновесия, фиксируемого гальванометром. Шкала гальванометра проградуирована в градусах Цельсия. Питание осуществляется от батареи или от другого источника постоянного тока.

В качестве чувствительных элементов термометров сопротивления используют медную, никелевую, вольфрамовую или платиновую проволоку, намотанную на каркас из изоляционного материала, помещенный в защитный кожух (рис.4.29). Характеристики термометра, диапазон измерений зависят от его конструкции и материала проволоки.

Наиболее широкий диапазон измерений имеет термометр, у которого чувствительный элемент имеет проволоку из платины (рис.4.30). Тер-

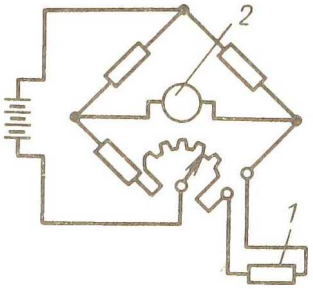


Рис.4.28. Принципиальная схема термометра сопротивления с уравновешенным мостом: 1 – элемент чувствительный; 2 – гальванометр

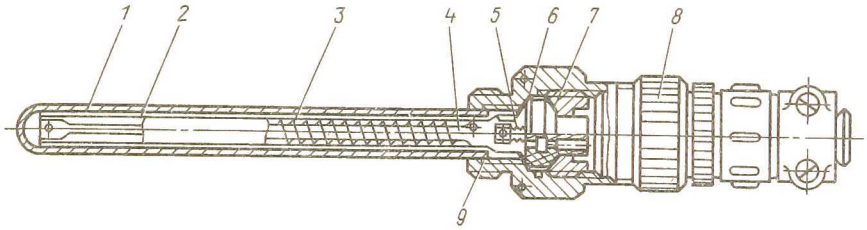


Рис. 4.29. Приемник термометра сопротивления:
1 — кожух; 2 — изоляция; 3 — проволока: 4 — каркас; 5 — сопротивление добавочное; 6, 7 — прокладки; 8 — разъем штепсельный; 9 — штуцер

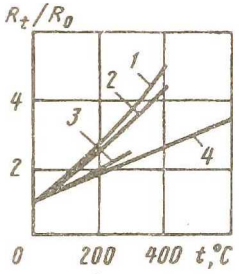


Рис. 4.30. Графики изменения сопротивления чувствительных элементов термометров сопротивления в зависимости от изменения температуры:
1 — с проволокой из железа; 2 — с проволокой из никеля; 3 — с проволокой из меди; 4 — с проволокой из платины

мометрами сопротивления можно измерять установившуюся температуру с точностью ±1,0 %.

Для определения температуры продуктов сгорания в камерах ЖРД методы контактного измерения не применимы. В этом случае возможно применение фотометрических или радиационных пирометров, принцип действия которых основан на использовании зависимости интенсивности и спектрального состава излучения от температуры нагретого тела. Трудности обеспечения стабильности работы этих устройств в условиях испытаний ЖРД значительно ограничивают применение их на практике, сводя его до уровня лабораторных экспериментов.

В то же время при доводке рабочих процессов в камерах ЖРД существенный интерес представляют потоки в ее поперечном сечении. Для получения нужной эпюры теплового потока в высокотемпературную

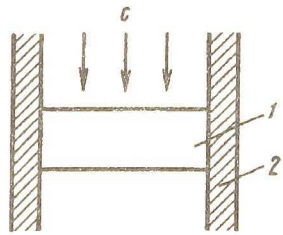


Рис. 4.31. Схема определения тепловых потоков:
1 — пластина; 2 — канал

движущуюся газовую среду помещают пластины 1 (рис.4.31) удобообтекаемой формы и по степени уменьшения их высоты вследствие выгорания оценивают тепловой поток. Материал пластины выбирают в зависимости от ориентировочных значений температуры, скорости, плотности, агрессивности газовой среды и времени пребывания в ней пластины. Площадь выгоревшей части пластины пропорциональна средней температуре торможения движущегося потока в определенной точке сечения за интервал времени, в течение которого пластина находится в горячем потоке. По результатам анализа изменения высоты пластины в разных точках может быть построена эпюра температур в определенном сечении.

4.2.3. Измерение силы

Тяга, развиваемая ЖРД на установившемся режиме работы, является важнейшим его параметром и определяет его основные характеристики. В связи с этим к точности ее измерения предъявляют высокие требования – допустимая предельная погрешность не должна превышать 0,5 % от номинального значения. Реализацию этих требований обеспечивают:

применением измерительных систем высокого класса точности;

установкой их на стендах в местах, защищенных от действия вибраций, переменных температур и других дестабилизирующих факторов;

градуировкой измерительной системы непосредственно до и после проведения огневого испытания;

периодической проверкой (аттестацией) измерительной системы с использованием эталонных устройств для подтверждения класса точности.

Однако необходимо точно определять тягу не только на установившихся режимах. Для обеспечения динамической устойчивости и прочности ракетной системы нужно определять темп нарастания тяги и ее экстремальное значение на участке запуска двигателя, амплитуду свободных и вынужденных колебаний тяги на основном режиме, темп уменьшения тяги на режиме выключения двигателя и импульс последействия.

Измерение тяги на переходных режимах затруднено. Это объясняется главным образом участием в процессе динамической передачи силы на измеритель силовой схемы крепления двигателя, параметры которой, и прежде всего жесткость, не обладают высокой стабильностью. Сама силовая схема характеризуется высокой динамической добротно-

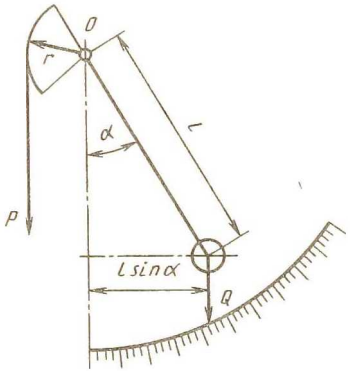


Рис. 4.32. Схема маятникового динамометра

стью, поэтому на фоне полезного сигнала появляются значительные по амплитуде свободные колебания с периодом, близким к характерному времени исследуемых динамических процессов. Эти обстоятельства приводят к необходимости применения для определения тяги при переходных процессах специальных измерительных устройств, включающих звенья с высокой собственной частотой, что обусловливает иногда целесообразность нахождения тяги косвенными методами по результатам измерения давления в камере.

Устройства для измерения силы можно разделить на три группы: механические, гидравлические и электрические.

Типичным для первой группы является маятниковый динамометр (рис.4.32). К рычагу длиной l подвешен груз, имеющий силу тяжести Q, который вместе с сектором радиуса r может вращаться вокруг точки O. К сектору приложена измеряемая сила P. Система приходит в равновесие, когда момент от силы P равен моменту от силы Q, действующему относительно точки O. Из уравнения равенства моментов находим

$$P = \frac{Ql\sin\alpha}{r}. \qquad (4.16)$$

В таком простейшем оформлении маятниковый динамометр неудобен из-за неравномерности шкалы. Для выравнивания шкалы сектор профилируют по закону $r = (a\sin\alpha)/\alpha$, тогда угол отклонения маятника прямо пропорционален приложенной силе:

$$P = \frac{Ql}{a}\alpha, \qquad (4.17)$$

где a – параметр, характеризующий начальное положение рычага.

Применяют и другие способы выравнивания шкалы. На рис.4.33 показана схема весовой головки, в которой использован рассмотренный принцип уравновешивания силы.

Такая головка получила наибольшее распространение при испытании двигателей средней и большой мощности. Измеряемая сила P через тя-

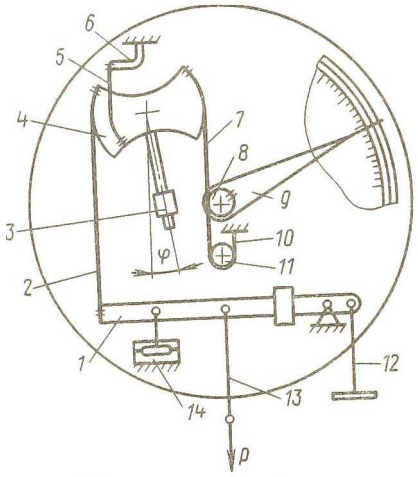


Рис. 4.33. Схема весовой головки: 1 — рычаг; 2,5,7,10 — ленты; 3, 11 — грузики; 4 — квадрант; 6 — кронштейн; 8 — барабан; 9 — стрелка; 12 — серьга; 13 — тяга; 14 — демпфер

гу 13 и приемный рычаг 1 передается лентой 2 на силоприемный сектор квадранта 4. Двумя лентами 5 квадрант подвешен на кронштейне 6 и может перекатываться по нему своими опорными секторами, занимая каждый раз такое положение, при котором момент от силы на ленте 2 уравновешивается моментом от силы тяжести квадранта. Квадрант связан с указательной стрелкой лентой 7, закрепленной одним концом на втором секторе квадранта, а другим — на барабане 8 оси стрелки 9. Постоянное натяжение стрелочного привода создается грузиком 11, подвешенным к барабану на ленте 10. Вся подвижная система демпфируется гидравлическим демпфером 14. Равномерность шкалы весовой головки, имеющей 1000 делений на дуге, ограничивающей угол, равный 300 °С, достигается благодаря небольшому углу отклонения квадранта от вертикали (2φ = = 36°) и наличию коррегирующего грузика 3. С помощью нагрузки, прилагаемой к стрелке 9 через серьгу 12, обеспечивается выбор возможного начального зазора. Погрешность измерения силы с помощью весовой головки ±0,2 %. Показания весовой головки используют для

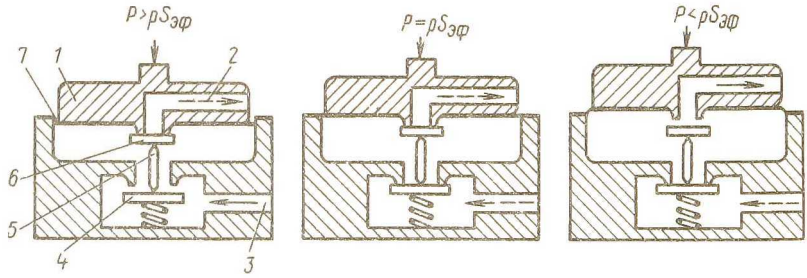


Рис. 4.34. Схема компенсационной диафрагменной месдозы: 1 — поршень; 2 — канал выходной; 3 — канал; 4,6 — клапаны подающий и сливной; 5 — толкатель; 7 — мембрана

визуального контроля тяги и регистрируют на фотопленку регистратором.

Метод уравновешивания использован и в другом устройстве для измерения тяги – гидравлическом динамометре. Принцип действия одной из его разновидностей – компенсационной месдозы – показан на рис.4.34. Тяга P действует на поршень 1, опирающийся на мембрану 7. Полости месдозы заполнены рабочей жидкостью, подаваемой через канал 3 насосом. Работой подающего 4 и сливного 6 клапанов управляют поршень и толкатель 5, связывающий оба клапана. При равенстве гидростатической силы и тяги ($pS_{эф} = P$, где $S_{эф}$ – эффективная площадь мембраны) схема находится в равновесии, т.е. тяга уравновешена гидростатической силой, при этом клапаны 4 и 6 закрыты. Измерение давления p в рабочей полости месдозы дает информацию о тяге, развиваемой двигателем. Измерение можно производить манометром или другим преобразователем давления.

При нарушении равновесия один из клапанов открыт, другой – закрыт. Такое положение удерживается до тех пор, пока схема опять не вернется к режиму полного уравновешивания, т.е. до закрытия клапанов и уравновешивания сил, причем новому значению тяги P будет соответствовать новое значение измеряемого давления p.

Погрешность измерения +0,2 ... –0,3 %. В качестве рабочей жидкости для гидравлических динамометров используют трансформаторное масло, глицерин, силиконовые жидкости. Для устойчивой и точной

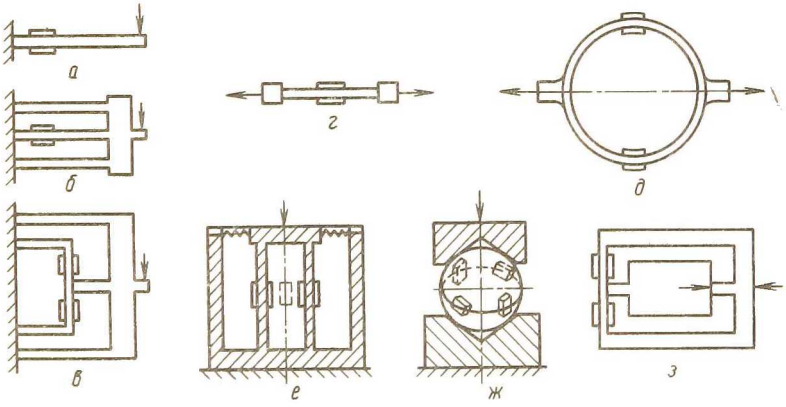


Рис.4.35. Различные типы упругих элементов тензометрических силоизмерителей:
а, б – для измерения малых сил; *в, г, д, е, ж, з* – для измерения больших сил

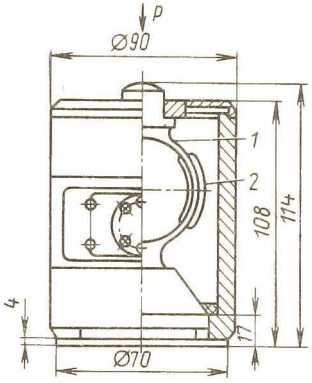


Рис. 4.36. Тензометрический преобразователь силы с кольцевым чувствительным элементом:
1 — кольцо; 2 — элемент чувствительный

работы месдозы площадь поршня выбирают такой, чтобы давление в полости под диафрагмой было в пределах 1...10 МПа.

Механические и гидравлические динамометры, обладающие высокими метрологическими свойствами, затрудняют процесс автоматизации испытаний, характерный для современного уровня развития техники. Поэтому наряду с ними при испытаниях ЖРД применяют электрические преобразователи силы, которые по мере их совершенствования становятся основными приборами для измерения тяги.

Среди этих приборов широко распространены тензометрические преобразователи. Упругие элементы тензометрических силоизмерителей могут быть выполнены по различным схемам (рис.4.35). Для измерения небольших сил применяют схемы *а* и *б*, так как они обладают максимальной чувствительностью. На рис.4.36 и 4.37 показаны примеры конструктивного выполнения тензометрических преобразователей силы, в которых в качестве чувствительных элементов применены кольцо и полый стержень с нанесенными на них рабочими тензометрами. Преобразователи предназначены для измерения тяги на статическом и динамическом режимах работы двигателей. Погрешность измерения установившихся значений тяги 0,75...1,5 %, частотный диапазон до 500 Гц.

В качестве электрических преобразователей силы, имеющих частотный выход, при испытаниях ЖРД применяют вибрационно-частотные преобразователи. Принцип их работы основан на зависимости частоты свободных колебаний струны f_0 от ее натяжения:

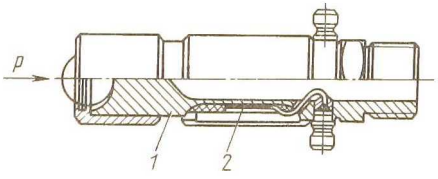


Рис. 4.37. Тензометрический преобразователь силы с цилиндрическим чувствительным элементом:
1 — стержень полый; 2 — тензометр

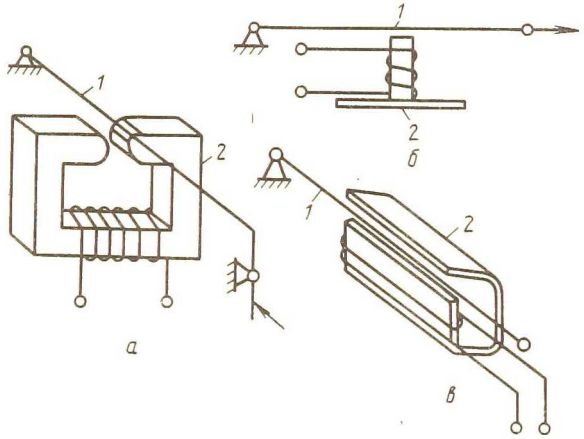


Рис.4.38. Схемы возбуждения колебаний стальных струн:
а – струны, втягивающейся в зазор; *б*, *в* – струны, притягивающейся к полюсу электромагнита; 1 – струна; 2 – система магнитная

$$f_0 = \frac{n}{2l}\sqrt{\frac{F}{\rho S}}, \qquad (4.18)$$

где n – номер гармоники свободных колебаний, обычно $n = 1$; l – длина струны; F – сила натяжения; ρ – плотность материала струны; S – площадь сечения струны.

Формула выведена из предположения, что жесткость струны изменяется только под действием внешней силы. Струну изготовляют из углеродистой стали, вольфрама или специальных сплавов. Свободные колебания струн возбуждаются по схемам, приведенным на рис.4.38.

Существенным недостатком вибрационно-частотных преобразователей, как, впрочем, и тензометрических, является зависимость их характеристик от температуры. В связи с этим принимают конструктивные меры, обеспечивающие компенсацию температурной погрешности.

Принцип действия вибрационно-частотного силоизмерителя основан на преобразовании силы, приложенной к упругому кольцу 1 (рис.4.39), в изменение частоты поперечных колебаний перемычки 2. Упругое кольцо и перемычка выполнены как одно целое. Для возбуждения и съема колебаний служит система, состоящая из двух электромагнитов 6 и 7, включенных на вход и выход усилителя. Стержень 3 служит для температурной компенсации и имеет аналогичную систему возбуждения и съема сигнала (электромагниты 5 и 4). Схема измерений предусматривает получение выходной величины, пропорциональной

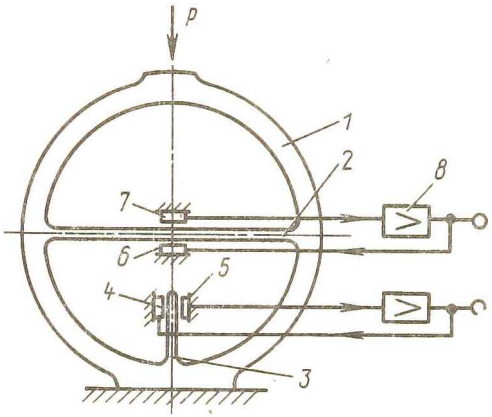


Рис. 4.39. Принципиальная схема вибрационно-частотного силоизмерителя:
1 — кольцо упругое; 2 — перемычка; 3 — стержень; 4, ..., 7 — электромагниты; 8 — усилитель

отношению частот. Вибрационно-частотные преобразователи силы обладают высокой статической точностью, погрешность измерений не превышает ±0,2 %. Возможности регистрации тяги динамических процессов ограничены значением номинальной частоты свободных колебаний струны (обычно f_0 = 1000...2000 Гц) и частотой опроса f (обычно f = = 5...10 кГц).

Учитывая динамические искажения, связанные с методом передачи силы на преобразователь, информацию, полученную как с тензометрического, так и с вибрационно-частотного преобразователя, можно подвергнуть операции восстановления. Эта операция может быть проведена, если известна динамическая структура канала связи и зависимость $P = f(\tau)$.

4.2.4. Измерение расхода компонентов

Как и значения тяги, развиваемой ЖРД на установившихся режимах, значения расходов компонентов на этих режимах являются исходной информацией для расчета основных характеристик ЖРД. Важное значение имеет также определение характера изменения расходов компонентов в магистралях ДУ на переходных режимах работы ЖРД. Необходимость обеспечения надежности ЖРД, выражающейся в бескавитационной работе насосов ТНА, устойчивости рабочих процессов в камере сгорания и газогенераторе, заданном качестве переходных процессов при регулировании ЖРД, значительно расширяет диапазон частот, в котором информация о колебаниях компонентов в магистралях ДУ должна быть получена с заданной погрешностью.

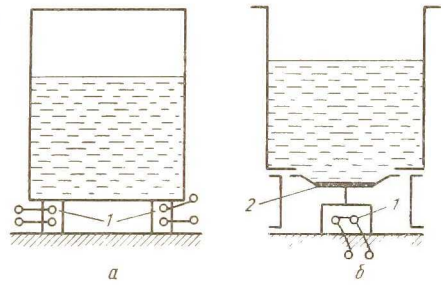


Рис.4.40. Схемы преобразователей уровня:
а, *б* – основанных на измерении массы сосуда с жидкостью и только жидкости; 1 – преобразователь силы; 2 – мембрана

Для измерения массовых расходов компонентов на установившемся режиме работы ЖРД применяют схемы, принцип действия которых показан на рис.4.40. В качестве первичных преобразователей массы расходных емкостей целесообразно применять такие приборы, как весовая головка, вибрационно-частотный преобразователь силы или гидравлические месдозы, которые обладают высокой статической точностью измерений. Недостатками такого способа измерения расходов компонентов являются влияние на точность измерения относительно малого изменения массы, трудоемкость градуировки средства измерений, большие погрешности измерения расходов криогенных компонентов. В связи с этим приведенные на рис.4.40 схемы чаще всего используют для контроля заправки расходных емкостей.

При измерении массового расхода компонентов можно использовать принцип, основанный на гидростатическом эффекте (рис.4.41). Платформа 3, на которой установлен топливный бак 2, опирается на шесть...восемь гидравлических динамометров – месдоз 5, половина из которых (тарные месдозы) уравновешивает собственную силу тяжести F конструкции платформы, бака, баллонов 7 и трубопроводов 1, 4, 6, а другая половина (измерительные месдозы) измеряет массу компонента. Схема уравновешивания силы тяжести F приведена на рис.4.42. Давление $p_{тар}$ в гидростатической опоре – тарной месдозе 1, создаваемое силой тяжести, уравновешивается давлением масла, подаваемого насосом:

$$p_{тар} = F/(nS_{п}), \qquad (4.19)$$

где n – число тарных месдоз (они все одинаковые); $S_{п}$ – площадь поверхности поршня 2.

По мере расхода топлива в бак через клапан 8 (см. рис.4.41) подают сжатый газ, чтобы обеспечить постоянное давление наддува.

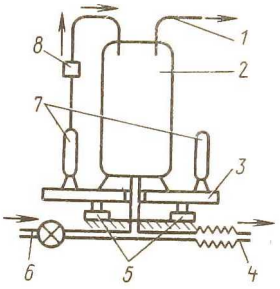


Рис. 4.41. Схема измерения расхода весовым способом:
1, 4, 6 — трубопроводы; 2 — бак топливный; 3 — платформа; 5 — месдоза; 7 — баллон; 8 — клапан

Это ведет к погрешности, однако, если баллоны 7 со сжатым газом поместить на платформе, погрешность исчезнет.

Измерение расхода можно проводить объемным методом или с помощью контроля уровня компонента в емкости путем выдачи релейных команд. На рис.4.43 показана схема реле уровня с магнитоуправляемыми контактами. На поплавке 3 укреплен постоянный магнит 2, магнитоуправляемые контакты 1 расположены за стенкой емкости. Точность поплавковых преобразователей уровня определяется стабильностью характеристик его элементов. Для снижения погрешности измерения целесообразно увеличивать площадь поплавка. Изменение плотности жидкости (вследствие насыщения газом или изменения температуры) влечет за собой увеличение погрешности.

Другой разновидностью устройств, применяемых для измерения установившихся значений расходов компонентов, являются дроссельные расходомеры. Принцип их действия основан на измерении перепада давлений на дроссельном устройстве, установленном в расходной магистрали ЖРД (рис.4.44). Объемный $\dot{V}$ и массовый $\dot{m}$ расходы определяют из соотношений

$$\dot{V} = \mu S \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_1 - p_2)};$$

$$\dot{m} = \mu S \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)}, \qquad (4.20)$$

где μ — коэффициент расхода; S — площадь проходного сечения дроссельного устройства.

Плотность компонента ρ определяется путем косвенных измерений, а коэффициент рас-

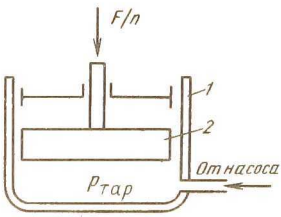


Рис. 4.42. Схема уравновешивания силы тяжести:
1 — месдоза тарная; 2 — поршень

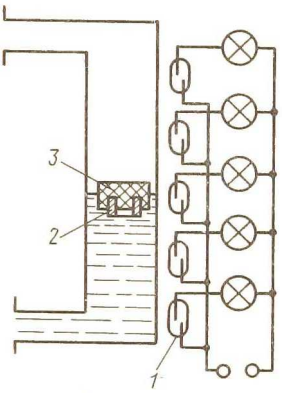


Рис. 4.43. Схема реле уровня с магнитоуправляемыми контактами:
1 — контакты магнитоуправляемые; 2 — магнит постоянный; 3 — поплавок

хода μ, как правило, экспериментальным путем при лабораторных проливках дроссельных устройств на специальных стендах. В качестве дроссельных устройств можно использовать диафрагмы различной конструкции, сопла Вентури и т.д. Недостатком данного метода является зависимость коэффициента расхода от многих факторов, таких, как схема установки преобразователя, условия течения жидкости, спектральный состав пульсаций в магистрали. Как правило, точность измерения значения μ определяет класс точности дроссельного расходомера. Для обеспечения высоких метрологических характеристик метода рекомендуется руководствоваться комплексом конструктивных и методических приемов, изложенных в Правилах 20–64 измерения расхода жидкости, газов и паров стандартными диафрагмами и соплами.

В качестве преобразователей перепада давлений, являющихся в схемах дроссельных расходомеров первичными преобразователями информации об изменении расхода, могут быть использованы электрические и электромеханические устройства. К недостаткам описанного метода измерения следует отнести сравнительно невысокую точность измерений расхода на установившихся режимах (погрешность составляет 1...3 %), нелинейность градуировочной характеристики, а также необходимость установки в расходную магистраль ЖРД дополнительного гидравлического сопротивления.

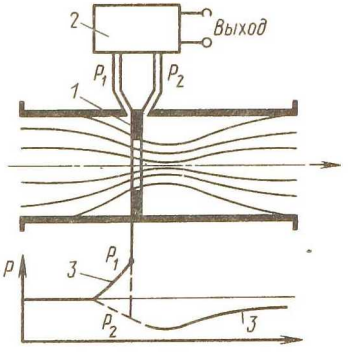


Рис. 4.44. Схема дроссельного расходомера:
1 — устройство дроссельное (диафрагма); 2 — преобразователь перепада давлений; 3 — кривая изменения давления (—— вдоль стенки канала; — — — вдоль оси канала)

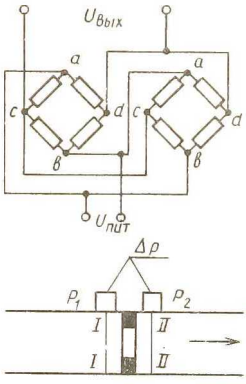


Рис.4.45. Схема преобразователя переменного расхода компонентов на тензометрических преобразователях давления

Следует, однако, заметить, что такой метод измерения позволяет существенно расширить частотный диапазон, в котором может быть получена информация о колебаниях расхода. Применение в качестве первичных преобразователей перепада давлений таких устройств, как тензометрические преобразователи, может обеспечить измерение пульсаций расхода до 300 Гц с погрешностью в 5...20 %. Такая погрешность часто вполне допустима при анализе внутридвигательных динамических процессов.

Принцип работы схемы преобразователя переменного расходомера компонентов, показанной на рис.4.45, основан на применении двух тензометрических преобразователей давления с идентичными градуировочными характеристиками, объединенных в электрическую цепь по схеме вычитания сигналов. Вычитание обеспечивается путем подачи питающего напряжения $U_{пит}$ разной полярности в диагонали ab. При этом в измерительной диагонали cd объединенной схемы напряжение $U_{вых}$ будет пропорционально разности давлений $p_1 - p_2$. Недостатком этого метода является необходимость обеспечения идентичности градуировочных характеристик тензометрических преобразователей давления, объединяемых в схему вычитания. Из линеаризованного уравнения Бернулли следует, что связь между амплитудами колебаний расхода и перепада давлений на сосредоточенном сопротивлении определяется выражением

$$\delta\dot{m} = \frac{1}{2}\,\frac{\dot{m}}{\Delta p}\,\delta\Delta p, \qquad (4.21)$$

где $\dot{m}$, Δp – осредненные значения массового расхода и перепада давлений, соответствующие установившемуся режиму течения; $\delta\dot{m}$, $\delta\Delta p$ – их амплитудные значения.

Так как разность давлений в сечениях I-I и II-II трубопровода определяется в электрической схеме преобразователя практически безынерционно, то источником динамической погрешности метода измерения является реактивное гидравлическое сопротивление участка

трубопровода между этими сечениями, которое может быть учтено для сравнительно малых $\theta = \omega l/a$(ω – угловая частота пульсаций; a – скорость распространения звука в системе; l – длина мерного участка) преобразованием формулы (4.21) в формулу

$$\delta\dot{m} = \frac{\delta\Delta p}{\sqrt{\left[\frac{2\Delta p}{\dot{m}}\right]^2 + \left[\frac{\rho l}{S}\omega\right]^2}}, \qquad (4.22)$$

где S – площадь проходного сечения.

Имеющиеся опытные данные о нестабильности характеристик сосредоточенного гидравлического сопротивления в условиях пульсирующего потока иногда заставляют обращаться к схеме измерения пульсаций расхода (рис.4.46). В этом случае связь между $\delta\dot{m}$ и $\delta\Delta p$ определяется выражением

$$\delta\dot{m} = \frac{S}{l}\frac{\delta\Delta p}{\omega}, \qquad (4.23)$$

где $\delta\dot{m}$ – амплитуда пульсаций расхода в сечении aa.

Если величиной θ пренебречь нельзя, то

$$\delta\dot{m} = \frac{S}{a}\frac{\delta\Delta p}{2\sin\frac{\omega l}{2a}}. \qquad (4.24)$$

Согласно выражению (4.23) сдвиг фаз между зарегистрированными колебаниями $\delta\Delta p$ и $\delta\dot{m}$ в сечении aa будет постоянным и равным $-\pi/2$.

Другим измерительным устройством, применяемым для исследования динамики течения компонентов в магистралях ЖРД, является индукционный расходомер. Принцип действия этого расходомера (рис.4.47) основан на индуцировании ЭДС при движении электропроводной жидкости в магнитном поле. Преимуществом индукционного расходомера является его практическая безынерционность, которая позволяет измерять переменные расходы. Однако вследствие ряда недостатков, свой-

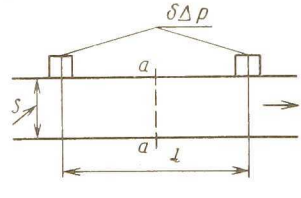


Рис.4.46. Схема измерения пульсаций расхода

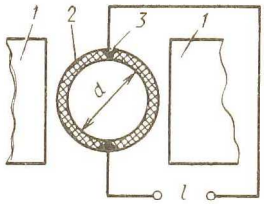


Рис. 4.47. Схема индукционного расходомера: 1 — источник магнитного поля; 2 — корпус трубопровода; 3 — электрод

ственных измерению индукционным расходомером таких, как нестабильность градуировочных характеристик (зависимость их от физического состояния жидкости), необходимость значительной электрической мощности (до 100 Вт) и сложность вторичной аппаратуры, его применение ограничено.

Не нашел практического применения при испытаниях ЖРД и ультразвуковой расходомер, который можно использовать и как уровнемер.

Стремление автоматизировать процесс испытаний, упростить градуировки, облегчить обслуживание системы измерения привело к необходимости использования при измерении расходов компонентов первичных преобразователей, работа которых основана на непосредственном преобразовании измеряемого параметра (расхода, скорости) в электрический сигнал. Небольшие геометрические размеры и малая масса таких преобразователей позволяют устанавливать их непосредственно в расходные магистрали. Остановимся на турбинном преобразователе расхода (рис.4.48), с помощью которого производят измерения с высокой статической точностью. Принцип его работы основан на зависимости частоты импульсов, возникающих в магнитоиндукционном узле приемника, от частоты вращения крыльчатки. В то же время частота вращения

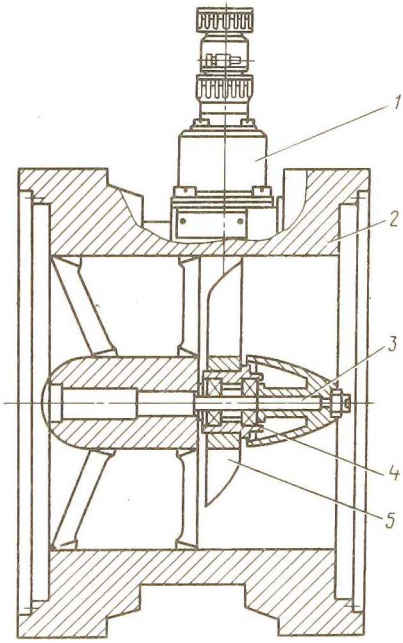


Рис. 4.48. Схема турбинного преобразователя расхода: 1 — узел магнитоиндукционный; 2 — корпус; 3 — ось крыльчатки; 4 — подшипник; 5 — крыльчатка

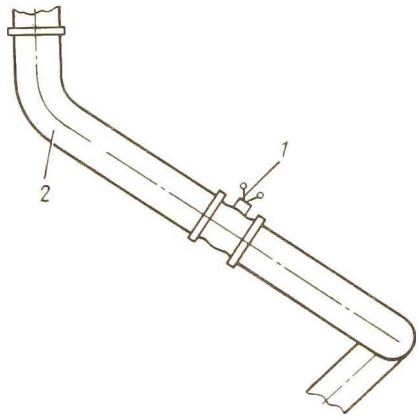


Рис.4.49. Схема установки турбинного преобразователя (1) расхода в топливной магистрали (2)

связана с объемным расходом линейной зависимостью $f = c\dot{V}$. где c – коэффициент, зависящий от конструкции крыльчатки (числа лопастей, силы трения в опорах и т.п.). Погрешность измерения расхода такими преобразователями в зоне устойчивой работы не превышает ±1,0 %.

В некоторых случаях представляется возможным использовать информацию, полученную с турбинного преобразователя расхода, для анализа динамических процессов, происходящих со сравнительно большими характерными временами или с низкими частотами. При постоянных времени T, характеризующих быстродействие преобразователей и равных 0,03...0,1 с, динамическая погрешность измерения довольно значительна, тем более что в принципе постоянная времени турбинного преобразователя зависит от уровня измеряемого расхода, т.е. меняется в зависимости от режима работы ЖРД.

Для улучшения метрологических свойств турбинных преобразователей принимают меры по обеспечению стабильности их градуировочных характеристик, которые выражаются в установке преобразователей на определенном прямолинейном участке расходного трубопровода (рис.4.49), периодической аттестации преобразователей при контрольных проливках, коррекции коэффициента c в функциональной зависимости $f(\dot{V})$ и дополнительном определении плотности компонента при пересчете измеренного преобразователем объемного расхода в массовый.

Простота и надежность работы турбинных преобразователей расхода при обеспечении довольно высокой точности измерений на установившемся режиме обусловили их широкое применение при огневых испытаниях ЖРД.

4.2.5. Измерение частоты вращения ротора ТНА

Из множества возможных схем измерения частоты вращения наиболее удачной для испытаний ТНА ЖРД является схема, основанная на использовании индукционного первичного преобразователя, аналогичного магнитоиндукционному узлу, применяемому в турбинных преобразователях расхода. Для ее реализации на роторе ТНА (рис.4.50) устанавливают диск 1 с одним, чаще с двумя (из условий обеспечения балансировки), магнитными элементами 3, а на корпусе 2 ТНА, в той же плоскости – индукционный преобразователь, состоящий из сердечника 4 с обмоткой 5. При прохождении магнитного элемента вблизи сердечника в обмотке наводится импульс ЭДС. Частота следования этих импульсов пропорциональна частоте вращения ротора ТНА.

Простота схемы измерения, отсутствие внешнего энергоснабжения, а также возможность получения высоких статической и динамической точностей измерения параметров ЖРД делает эту схему удобной при испытаниях ЖРД. Погрешность измерения частоты вращения ротора ТНА на установившемся режиме, определяемая точностью измерения периода следования импульсов, не превышает 0,2 %. В то же время схема измерения может быть построена таким образом, что позволит фиксировать время каждого оборота ротора через один оборот (интервал времени для работы счетной схемы), т.е. будут регистрироваться практически мгновенные значения частоты вращения ротора. Информация о текущем значении частот вращения может быть получена как в аналоговой, так и в цифровой форме в зависимости от схемного решения вторичного преобразователя. Аналоговая информация более наглядна, но цифровая обеспечивает бóльшую точность.

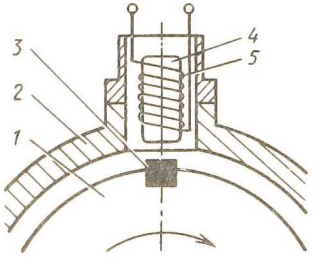


Рис.4.50. Схема измерения частоты вращения ротора ТНА:
1 – диск; 2 – корпус ТНА; 3 – элемент магнитный; 4 – сердечник; 5 – обмотка

4.2.6. Измерение параметра, характеризующего положение регулирующих органов

Для определения входных воздействий на ЖРД со стороны системы управления (системы регулирования кажущейся скорости, автомата стабилизации, системы опорожнения баков), оценки точности настройки ЖРД на заданный режим на регулирующих органах (регуляторе тяги и соотношения компонентов), а также на исполнительных органах системы опорожнения баков – дросселях устанавливают реостатные потенциометры. Валик потенциометра жестко связан с подвижным элементом регулирующего органа, что позволяет точно определять его положение в данный момент. Так как практически все электромеханические приводы, управляющие положением регулирующих органов ЖРД, преобразуют командный электрический сигнал от системы управления ракетой в угловое перемещение своего силового исполнительного элемента, то и для контроля этого перемещения применяют потенциометрические преобразователи угла поворота. Пределы измерения составляют ±12... ±64°.

Выходная градуировочная характеристика потенциометра связывает изменение его относительного сопротивления или выходного напряжения, снимаемого с реостата, с углом поворота валика. Основная погрешность типового потенциометра положения (рис.4.51) не превышает десятых долей градуса и определяется густотой навивки проволоки на неподвижную часть реостата и шириной ломели. Для предотвращения нарушений в работе потенциометра, вызванных воздействием ударных и вибрационных нагрузок, следует принимать специальные меры по их виброизоляции, используя, например, амортизаторы из металлорезины.

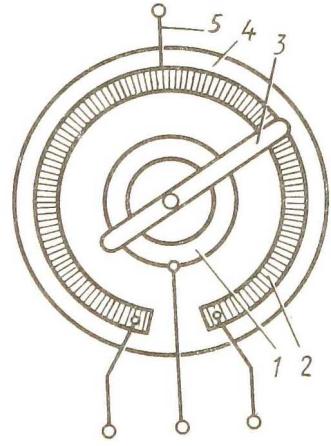


Рис.4.51. Схема типового потенциометра положения:
1 – контакт; 2 – реостат; 3 – ползунок; 4 – корпус; 5 – клемма

4.2.7. Измерение параметров вибраций и напряженности конструкций

Немаловажную роль, особенно в процессе опытной отработки ЖРД, расчета запасов прочности и оценки надежности работы конструкции, играет контроль параметров, определяющих состояние силовой схемы ЖРД, а также вибрационные нагрузки на его узлы и агрегаты. В связи с этим при доводочных испытаниях осуществляют широкие программы тензометрирования и вибрографирования узлов и агрегатов ЖРД.

Из существующего многообразия первичных преобразователей параметров вибраций при испытаниях ЖРД наиболее часто используют пьезоэлектрические преобразователи, что объясняется их малыми габаритными размерами и массой, широким частотным диапазоном. Эти преобразователи работают по принципу сейсмического эффекта, т.е. инерционного смещения массы чувствительного элемента под действием вибрационного нагружения. При этом возможны два варианта преобразования входного сигнала:

при частоте свободных колебаний ω_0 чувствительного элемента преобразователя, превышающей верхний предел частоты вибрации ($\omega_0 > 3\omega_{max}$), выходной сигнал преобразователя пропорционален вибрационному ускорению и схема измерения параметров вибрации сводится к последовательному интегрированию выходного напряжения (рис. 4.52, *а*);

при частоте свободных колебаний чувствительного элемента, меньшей нижнего предела частоты вибрации ($\omega_0 < 3\omega_{min}$), инерционная

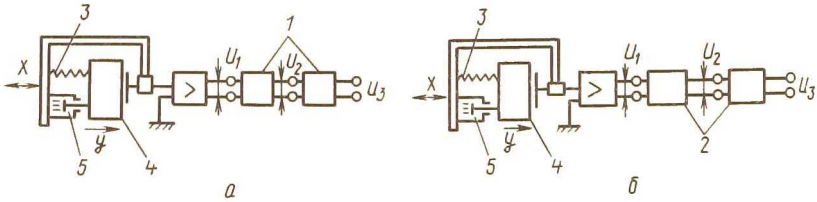


Рис. 4.52. Схемы измерений параметров вибраций:
а – при $\omega_0 > 3\omega_{max}$; *б* – при $\omega_0 < 3\omega_{min}$; 1, 2 – звенья интегрирующее и дифференцирующее; 3 – подвес; 4 – масса инерционная; 5 – демпфер; x – параметр, характеризующий вибрацию конструкции; y – параметр, характеризующий вибрацию чувствительного элемента; U_1, U_2, U_3 – напряжения

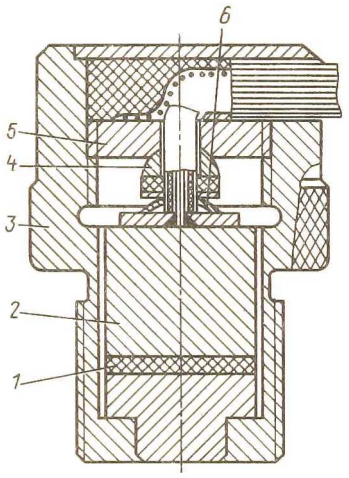


Рис.4.53. Схема пьезоэлектрического преобразователя вибраций:
1 – диск; 2 – груз вольфрамовый цилиндрический; 3 – корпус; 4 – полусфера; 5 – гайка; 6 – пружина

масса остается практически неподвижной, а выходное напряжение с преобразователя – пропорциональным относительному перемещению корпуса и массы чувствительного элемента, т.е. вибросмещению. В этом случае схема измерения параметров вибрации сводится к последовательному дифференцированию выходного напряжения (рис.4.52, *б*).

Частота свободных колебаний определяется параметрами преобразователя, инерционной массой и жесткостью ее подвеса. Равномерность частотной характеристики зависит от степени и стабильности параметров демпфирования чувствительного элемента.

В практике обычно применяют сейсмические преобразователи, работающие в диапазоне частот $\omega_0 > 3\omega_{max}$, так как дифференцирование выходного напряжения вносит значительные погрешности в регистрацию полезного сигнала, делает систему измерений очень чувствительной к электрическим помехам. Действие пьезоэлектрического преобразователя вибраций типа ПД-1 основано на преобразовании силы, возникающей при ускоренном движении инерционной массы, в электрический заряд. Заряд возникает на поверхности пьезоэлектрического диска 1 (рис.4.53). Инерционной массой является вольфрамовый цилиндрический груз 2, закрепленный в корпусе 3 гайкой 5 через полусферу 4 и пружину 6, что делает его нечувствительным к поперечным вибрациям. Пьезокерамический диск и груз склеены между собой и приклеены к основанию преобразователя.

В качестве чувствительных элементов в преобразователях вибраций применяют кварц, титанат бария и различные керамики. Для кварцевых элементов характерны невысокая чувствительность и малая температурная погрешность, для титаната бария, наоборот, – большая чувствительность, но и большая температурная погрешность. Известно, что пьезоэлектрический элемент, находящийся в преобразователе вибраций, реагирует на вибрационное нагружение лишь в осевом направле-

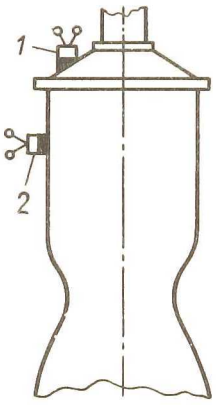


Рис.4.54. Схема установки преобразователей (1, 2) для измерения параметров вибраций камеры сгорания ЖРД

нии. В связи с этим для определения вибрационного состояния испытываемого агрегата устанавливают несколько преобразователей. Так, при вибрографировании камеры ЖРД целесообразно размещать преобразователи вибраций по схеме, приведенной на рис.4.54. Преобразователь вибраций 1 позволяет судить о вибрационных нагрузках, действующих в направлении продольной оси камеры сгорания; преобразователь вибраций 2 – о вибрационных нагрузках, действующих в радиальном направлении. Существенная разница в их показаниях возможна, например, при возникновении в камере сгорания продольных или поперечных высокочастотных пульсаций давления, связанных с развитием процесса неустойчивого горения.

При доводочных испытаниях ЖРД проводят подробное вибрографирование не только камеры, но и таких узлов, как ТНА, газогенератор, рама двигателя, органы управления и регулирования.

Для определения напряженности узлов и агрегатов ЖРД при огневых испытаниях широко используют тензометрирование. Проволочные или фольговые тензометры наклеивают на исследуемый элемент ЖРД и включают в схему электрического моста или полумоста.

Промышленность выпускает множество типов тензометров с базами от нескольких до десятков миллиметров. Принцип работы таких преобразователей деформаций или напряжений (в зависимости от интересующего параметра нагружения, в соответствии с которым и проградуированы тензометры) аналогичен принципу их работы в схемах тензометрических измерителей давлений или сил. Тензометрированию при испытаниях ЖРД подвергают такие узлы, как камера, сопло, газогенератор, ТНА, трубопроводы, элементы автоматики и системы измерения. В зависимости от входного сопротивления преобразующей аппаратуры при тензометрировании можно регистрировать полные значения напряжения и деформации или только их переменные составляющие.

4.3. ВТОРИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИНФОРМАЦИИ

Большинство рассмотренных первичных преобразователей требуют промежуточного преобразования или усиления выходного электрического сигнала перед подачей его на регистрирующее устройство. Питание электрической схемы первичного преобразователя, фильтрация выходного сигнала, согласование с регистрирующим устройством осуществляются, как правило, с помощью вторичных преобразователей. Типовой является структурная схема вторичного преобразователя, предназначенного для усиления, преобразования и фильтрации электрических сигналов с тензометрических измерителей силы, давления, деформации (рис.4.55). Как правило, вторичные преобразователи выполняют с несколькими каналами (с двумя ... шестью). Выходной каскад вторичного преобразователя предназначен для согласования схемы с регистрирующими устройствами, которых в общем случае может быть несколько, например два – шлейфовый осциллограф и магнитное регистрирующее устройство.

Обязательной является метрологическая аттестация вторичного преобразователя, при которой определяются статические и динамические погрешности, вносимые им в процесс измерения. Основные составляющие статической погрешности: нелинейность градуировочной характеристики, нестабильность нулевого уровня и коэффициента усиления, гистерезис – определяются при изменении действующих внешних факторов (времени, температуры окружающей среды, параметров внешнего источника питания и др.) в пределах ТУ. Сложением этих составляющих погрешности определяют основную погрешность. В паспорте преобразователя составляющие основной погрешности обычно дифференцированы.

Динамическую точность вторичного преобразователя оценивают по параметрам амплитудных и фазовых частотных характеристик. Преимущество такой оценки заключается в возможности аппроксимации дина-

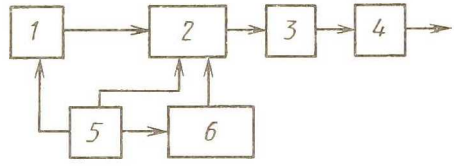


Рис.4.55. Типовая структурная схема вотричного преобразователя: 1 – преобразователь первичный; 2 – каскад усиления сигнала; 3 – каскад выходной; 4 – блок сменных фильтров; 5 – блок питания; 6 – блок калибровки и управления

мической погрешности измерения передаточной функцией, что позволяет облегчить восстановление информации при любом характере изменения измеряемого параметра. Как статические, так и динамические погрешности вторичных преобразователей определяют экспериментально с использованием эталонных или образцовых приборов.

Одним из основных требований, предъявляемых к вторичным преобразователям, является также стандартизация выходного сигнала. Для аналоговых преобразователей это выражается в изменении выходного напряжения в пределах от 0 до 6 В при изменении нагрузки на первичный преобразователь от 0 до максимального значения, соответствующего верхнему пределу измерения. В зависимости от индивидуальных особенностей схем вторичных преобразователей изменение выходного напряжения может быть трансформировано в изменение силы тока, частоты, кода и т.д. Характер выходного сигнала вторичного преобразователя определяет тип регистрирующего устройства, с которым он стыкуется. Для обеспечения наглядности получаемой информации, а также возможности быстрой автоматизированной обработки ее на вычислительных устройствах целесообразно в процессе испытаний регистрировать каждый параметр на аналоговое регистрирующее устройство (типа шлейфового осциллографа) и на магнитное регистрирующее устройство, позволяющее осуществлять быстрый ввод информации в ЭВМ.

Основные типы вторичных преобразователей, применяемых при испытаниях ЖРД, – ЛХ-7006 и ЛХ-7000 (для передачи электрических сигналов с тензометрических первичных преобразователей), а также ИД-2И и ИВП-2 (для передачи электрических сигналов с индуктивных первичных преобразователей) – имеют стандартизованный выходной сигнал и частотный диапазон до 1000 Гц, а преобразователь ИВП-2 – до 10 000 Гц. Все они работают от переменного тока напряжением 220 В.

4.4. СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ

Для регистрации параметров при испытаниях ЖРД выбирают устройства различных типов в зависимости от требований по оперативности, наглядности, статической и динамической точности, хранению результатов испытания, а также по степени автоматизации процесса их обработки. Так, в процессе подготовки к запуску ЖРД необходимо обеспечить визуальный контроль за давлением и температурой компонентов топлива, температурой элементов конструкции, т.е. возникает необходимость использования стрелочных или цифровых индикаторов, пока-

зания которых для контроля действий оператора должны быть зарегистрированы. В то же время в процессе испытания множество измеряемых параметров, а также быстрое развитие процессов в ЖРД обусловливают необходимость применения многоканальных быстродействующих регистраторов, позволяющих с высокой точностью экспонировать информацию и автоматизировать ее вторичную обработку на вычислительных устройствах. Рассмотрим различные типы регистраторов.

Визуальные регистраторы применяют для фотографирования показаний стрелочных и цифровых индикаторных приборов, таких как манометры, измеряющие медленноменяющиеся давления в узлах ЖРД и системах стенда, весовые головки для измерения тяги и давления в камере, указатели наполнения топливных емкостей и т.п. Обычно эти приборы группируют в определенных отсеках стенда или пульта управления и их показания регистрируют специальным фотоаппаратом на пленку с интервалом в 1...10 с. Одновременно фиксируют и время.

Автоматические компенсаторы и мосты применяют для регистрации медленноменяющихся параметров – температур, давлений, перемещений, сил. Обычно они выполняют функцию дублирующих регистраторов или регистраторов визуального контроля при больших экспериментальных программах, таких, например, как термометрирование узлов ЖРД. Автоматические компенсаторы или потенциометры служат для измерения напряжения и силы тока, а автоматические мосты – в основном для измерения сопротивления.

В автоматических компенсаторах изменяемое напряжение на первичном преобразователе или усилителе компенсируется известным напряжением стабилизированного источника, а в автоматических мостах изменяемое сопротивление уравновешивается переменным сопротивлением реохорда. Показания регистраторов этого типа фиксируют на ленточной или круговой диаграмме.

Основные технические данные наиболее распространенных регистраторов этого типа приведены в табл.4.1.

Полученную информацию используют обычно для экспресс-анализа результатов испытания и проверки функционирования многочисленных вспомогательных стендовых систем.

Светолучевые регистраторы являются наиболее распространенными регистраторами большинства основных параметров ЖРД. В связи с широким использованием при стендовых испытаниях ЖРД автоматизированных систем обработки результатов измерений доля информации, получаемая с использованием светолучевых регист-

Таблица 4.1

Тип регистратора	Число регистрируемых параметров	Скорость перемещения диаграммы, мм/ч
Автоматический компенсатор постоянного тока ЭПП-09	1, 3, 6, 12, 24	60...14400
Автоматические мосты:		
ЭМП-109	1	60...9600
ЭМП-209	3–24	

Примечание. Основная погрешность приведенных в таблице приборов ±0,5 %, длина шкалы 275 мм.

раторов (осциллографов), уменьшается. Но специфические задачи, решаемые при проведении специальных динамических испытаний, испытаний при проверке эффективности систем автоматической аварийной защиты и других, не позволяют полностью отказаться от их использования. Простота обслуживания и надежность работы осциллографов, малые габаритные размеры и энергопотребление делают их незаменимыми в мелкосерийном производстве и при опытных испытаниях.

Современные осциллографы позволяют регистрировать сигналы с частотами до 10 кГц. Они обычно многоканальные – имеют 16, 20 и более каналов. Сигналы регистрируются на фотопленку или фотобумагу, которые требуют последующей химический обработки. Этот недостаток, приводящий к увеличению погрешности из-за усадки бумаги и пленки после химической обработки на 2...3 %, можно устранить, применяя бумагу типа УФ, чувствительную к ультрафиолетовым лучам и не требующую последующей химической обработки.

В качестве чувствительных элементов в осциллографах применяют магнитоэлектрические системы с петлевыми или рамочными гальванометрами (рис.4.56). Чувствительность и частотный диапазон гальванометров определяются геометрией подвижной системы, ее массой, степенью демпфирования и жесткостью подвеса. Демпфирование подвижной системы гальванометра может быть осуществлено с помощью вязкой жидкости или магнитоиндукционного эффекта, иногда для этой цели используют воздух. С увеличением чувствительности гальванометра его рабочий частотный диапазон сужается.

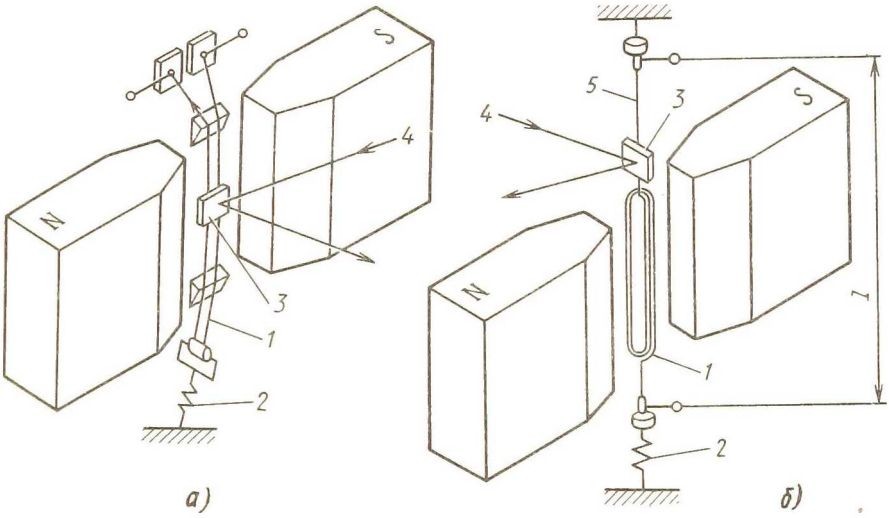


Рис. 4.56. Типичные схемы осциллографических гальванометров:
а – петлевого; *б* – рамочного; 1 – проводник; 2 – растяжка; 3 – зеркало; 4 – луч световой; 5 – подвес; *I* – сила тока измеряемая

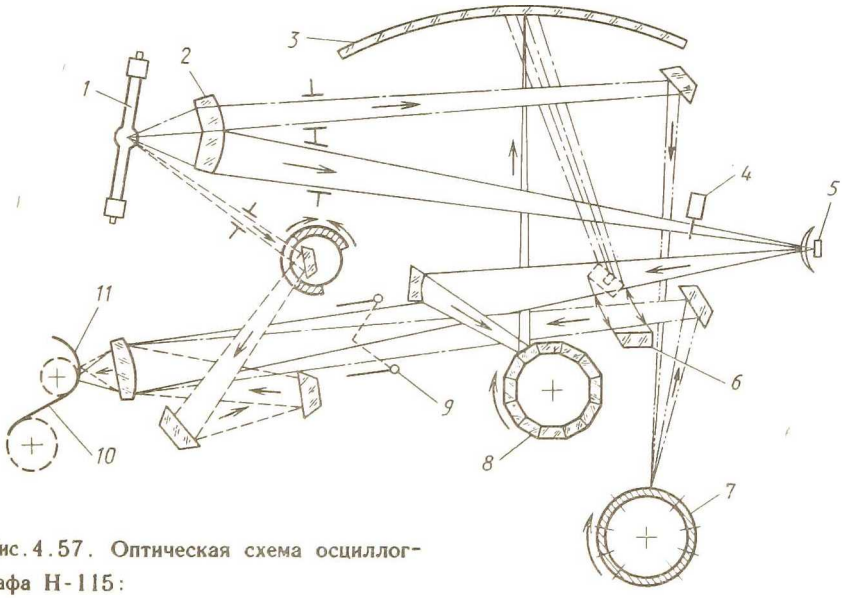


Рис. 4.57. Оптическая схема осциллографа Н-115:
1 – источник света; 2 – конденсатор цилиндрический; 3 – экран матовый; 4 – флажок; 5, 6 – зеркала; 7, 8 – барабаны; 9 – диафрагма; 10 – фотолента; 11 – пластина

Наиболее часто при испытаниях ЖРД используют осциллографы Н-115, К-115, К-20-21, Н-700, Н-102, МПО-2. Принцип действия их во многом схож. В осциллографе Н-115 (рис.4.57) световой поток от источника света 1 в виде яркой полосы с помощью цилиндрического конденсора 2 приводится в плоскость зеркала 5 гальванометра. Отраженный от зеркала световой поток фокусируется на плоскость фотоленты 10 в виде пятна, которым и осуществляется запись. Интенсивность записи регулируется с помощью диафрагм 9. Часть светового потока, идущего от зеркала гальванометра, с помощью зеркального развертывающего барабана 8 направляется на матовый экран 3 для визуального наблюдения. На пути потока расположен идентификатор, флажок 4 которого поочередно прерывает световые потоки, идущие от зеркала гальванометра, благодаря чему в линиях записи появляются разрывы, позволяющие прослеживать ход линии при их слиянии или пересечении.

Для регулирования начального положения гальванометра используют специальное зеркало 6, которое может быть установлено на пути потока, идущего от гальванометра к объекту. По этому зеркалу проходит матовая полоса, которая делит его отражающую поверхность пополам, поэтому на экране световой поток от каждого гальванометра представляется в виде двух световых полосок. При правильной установке гальванометра эти полоски имеют примерно равную яркость и равную длину.

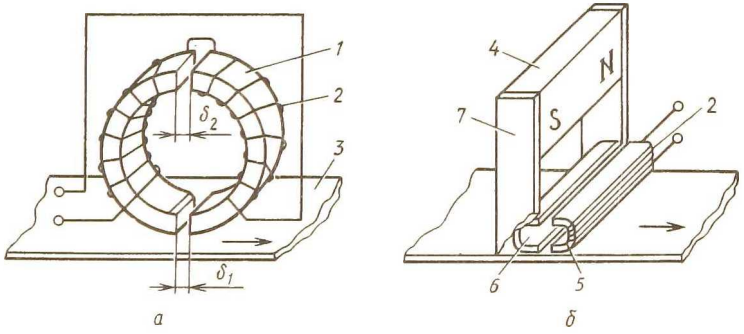
Одновременно с записью измерительных сигналов на фотоленту осциллографа типа Н-115 методом вертикального графления наносятся линии отметок времени. Световой поток показан на схеме штрихпунктирной линией. Роль модулятора светового потока выполняет вращающийся барабан 7 с десятью прорезями, одна из которых шире остальных девяти. При установке скорости протяжки фотоленты одновременно устанавливается одна из четырех частот вращения барабана – 3, 30, 300 или 3000 об/мин, что дает интервал времени между отметками 2; 0,2; 0,02 или 0,002 с.

Каждая линия отметки времени перекрывает фотоленту по всей ширине. Световой поток продольного графления показан на схеме штриховыми линиями. Через систему зеркал световой поток проецируется на фотоленту в виде яркой линии, перед фотолентой находится пластина 11 с рядом узких щелей, через которые происходит экспонирование. В результате на осциллограмме получаются тонкие линии продольного графления, что облегчает процесс обработки результатов измерения. В качестве источника света в осциллографе Н-115 можно применять лампы накаливания (при записи на фотобумагу с последую-

щим проявлением) или ртутные лампы ультрафиолетового излучения (при записи на фотобумагу типа УФ). В схемах осциллографов Н-115 предусмотрена возможность полного дистанционного управления режимом работы.

Магнитные аналоговые регистраторы нашли широкое применение в современных автоматизированных измерительно-вычислительных комплексах. К достоинствам этих приборов следует отнести большую информативность (многоканальная регистрация быстропеременных процессов с незначительной погрешностью), возможность непосредственного ввода информации в ЭВМ и многократного ее воспроизведения, удобство и длительность хранения носителя информации. Из недостатков надо отметить почти полное отсутствие наглядности получаемой информации, трудность определения ее качества в процессе регистрации, временные искажения при синхронизации записи с другими регистраторами и между каналами самого магнитного регистратора.

Основными элементами регистратора являются блоки магнитных головок записи и воспроизведения, а также лентопротяжный механизм. В схему регистратора входит преобразователь входного напряжения по принципу амплитудной модуляции несущей частоты или импульсно-частотной модуляции. Магнитную ленту изготовляют на диацетатной или лавсановой основе, поперечная плотность записи 1,5 мм на одну дорожку, т.е. при ширине ленты 35 мм можно регистрировать информацию с 20...22 каналов. Длина ленты от 500 до 1000 м.



а *б*

Рис.4.58. Схемы магнитных головок:
а – обычного типа для продольной записи; *б* – для записи методом смещения; 1 – магнитопровод; 2 – катушка управления магнитным полем; 3 – носитель; 4 – магнит постоянный; 5 – ярмо; 6 – шунт; 7 – сердечник управляющего магнита

Кольцевой магнитопровод магнитных головок (рис.4.58) набран из тонких листов пермаллоя. Ширина рабочей щели δ_1, обеспечивающая хорошую фокусировку магнитного поля, находится в пределах 0,02...0,03 мм.

В магнитном аналоговом регистраторе (рис.4.59) сигналы с первичных преобразователей или вторичной усилительной аппаратуры поступают через блоки 1 и 2 частотных модуляторов на блок магнитной записи 3. Блоки частотных модуляторов осуществляют операцию преобразования входного напряжения в импульсную последовательность, модулированную по частоте. Блок магнитной записи кроме регистрации сигналов позволяет контролировать качество работы измерительной системы, перематывать магнитную ленту. Блок калибровки 4 служит для формирования меток времени, подачи калибровочных импульсов, питания головок блока магнитной записи. Блок фазных трансформаторов 5 обеспечивает работу электродвигателей лентопротяжного механизма блока магнитной записи. Блоки выпрямителей 6 и стабилизации напряжения 7 питают электрическую схему регистратора.

Из 19 каналов типового аналогового магнитного регистратора 16 используют для записи информации от измерительной системы, 3 – для служебной информации (меток времени, прохождения команд и т.п.). Входное сопротивление регистратора 510 кОм, диапазон изменения входного напряжения 0...6 В, регистрируемые частоты 0...4000 Гц, время непрерывной работы 10 мин при скорости протяжки магнитной ленты 800 мм/с. Точность магнитных аналоговых регистраторов невелика, погрешность записи и воспроизведения регистрируемого сигнала ±3 %. Магнитные аналоговые регистраторы применяют в системах измерения пульсаций, вибраций, деформаций, где требования по возможности автоматизации процесса обработки результатов измерений превалируют над требованиями по точности получаемой информации.

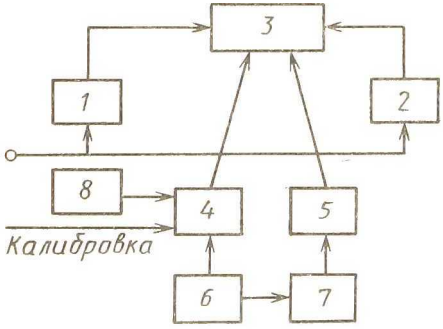


Рис.4.59. Структурная схема магнитного аналогового регистратора: 1, 2 – блоки частотных модуляторов; 3 – блок магнитной записи; 4 – блок калибровки; 5 – блок фазных трансформаторов; 6 – блок выпрямителей; 7 – блок стабилизации напряжения; 8 – система единого времени

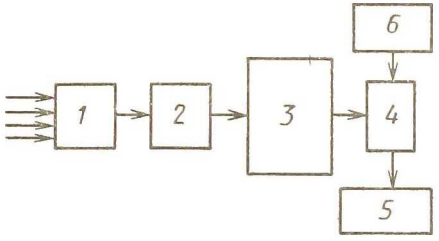


Рис.4.60. Структурная схема магнитного дискретного регистратора: 1 – устройство выносное; 2 – пульт выносной; 3 – стойка преобразования; 4 – регистратор магнитный; 5 – устройство графическое; 6 – система единого времени

Магнитные дискретные регистраторы используют в качестве носителей первичной информации в измерительно-вычислительных комплексах, позволяющих полностью автоматизировать процесс обработки полученной информации. Измерительно-вычислительные комплексы включают комплекс ЭВМ, устройства ввода и преобразования информации, банк программ – математическое обеспечение комплекса.

У магнитных дискретных регистраторов, как и у аналоговых, сигналы фиксируются на магнитную ленту. Принципиальным отличием магнитных дискретных регистраторов является фиксация информации в виде кода с кадровой экспозицией через заданный интервал времени. Частота опроса каждой линии связи может изменяться в диапазоне 50...400 $с^{-1}$. Зарегистрированные на магнитную пленку процессы можно воспроизвести на электрографическом устройстве, что в значительной мере повышает наглядность получаемой информации и позволяет провести экспресс-анализ результатов испытания. Основная же обработка производится по имеющимся в банке программам на измерительно-вычислительном комплексе с получением высокоточной информации в форме или таблиц время – параметр, или характеристик ЖРД.

В магнитном дискретном регистраторе (рис.4.60) сигналы с первичных преобразователей или вторичной усилительной аппаратуры поступают через выносное устройство 1 и выносной пульт 2 на стойку 3 преобразования в код и затем на магнитный регистратор 4. Может быть использовано и графическое устройство 5. Емкость регистратора при частоте опроса 100 $с^{-1}$ равна 64 линиям связи, погрешность 0,2...0,5 %. Высокая стоимость магнитных дискретных регистраторов, и особенно вторичных систем обработки информации, делает их применение рентабельным лишь на крупных испытательных станциях или в научно-исследовательских центрах.

4.5. СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ РЕГИСТРАТОРОВ

При испытании современного ЖРД регистрируют одновременно более ста различных параметров, по изменению которых во времени судят о качестве и устойчивости рабочего процесса, работе элементов ЖРД и т.д. Измеряемые параметры обладают различными характерными скоростями изменения, требования к точности их регистрации различны, сигналы регистрируются разными по принципу действия приборами. Для расшифровки и последующей обработки информации необходимо обеспечить синхронизацию всех применяемых при испытаниях регистраторов. Особенно это важно при опытно-конструкторских испытаниях, когда при их аномальном исходе возникает необходимость точного описания развития аварийной ситуации для локализации неисправности. Задачу решают применением специальной системы синхронизации, обеспечивающей одновременную запись на всех регистраторах сигналов времени, вырабатываемых одним общим источником. Системы генерации и распределения высокоточных сигналов времени получили название систем единого времени.

Независимо от схемных и конструктивных особенностей системы единого времени состоят из двух блоков – аппаратуры центрального поста и аппаратуры приемных постов. Для синхронизации по времени всех регистраторов в аппаратуре центрального поста вырабатывается сигнал в виде периодических импульсов. Эти импульсы по линиям связи передаются на аппаратуру приемного поста. Так как характер процессов, регистрируемых различными средствами, различен, то и частота сигналов системы единого времени тоже различна. Периодические импульсы вырабатываются непрерывно, но передача их на аппаратуру приемных постов начинается только с момента, условно принятого за начало испытания, который и служит условным нулем для отсчета времени. За этот момент могут быть приняты команды "Включение продувки" или "Зажигание", которые подаются с пульта управления в систему единого времени.

В аппаратуру центрального поста системы единого времени (рис.4.61) входят хронизатор, смеситель, кодирующие устройства и выходные блоки.

Х р о н и з а т о р обеспечивает генерацию импульсов с заданной частотой, включение выходных блоков и установку на ноль пересчетной схемы кодирующего устройства в этот момент.

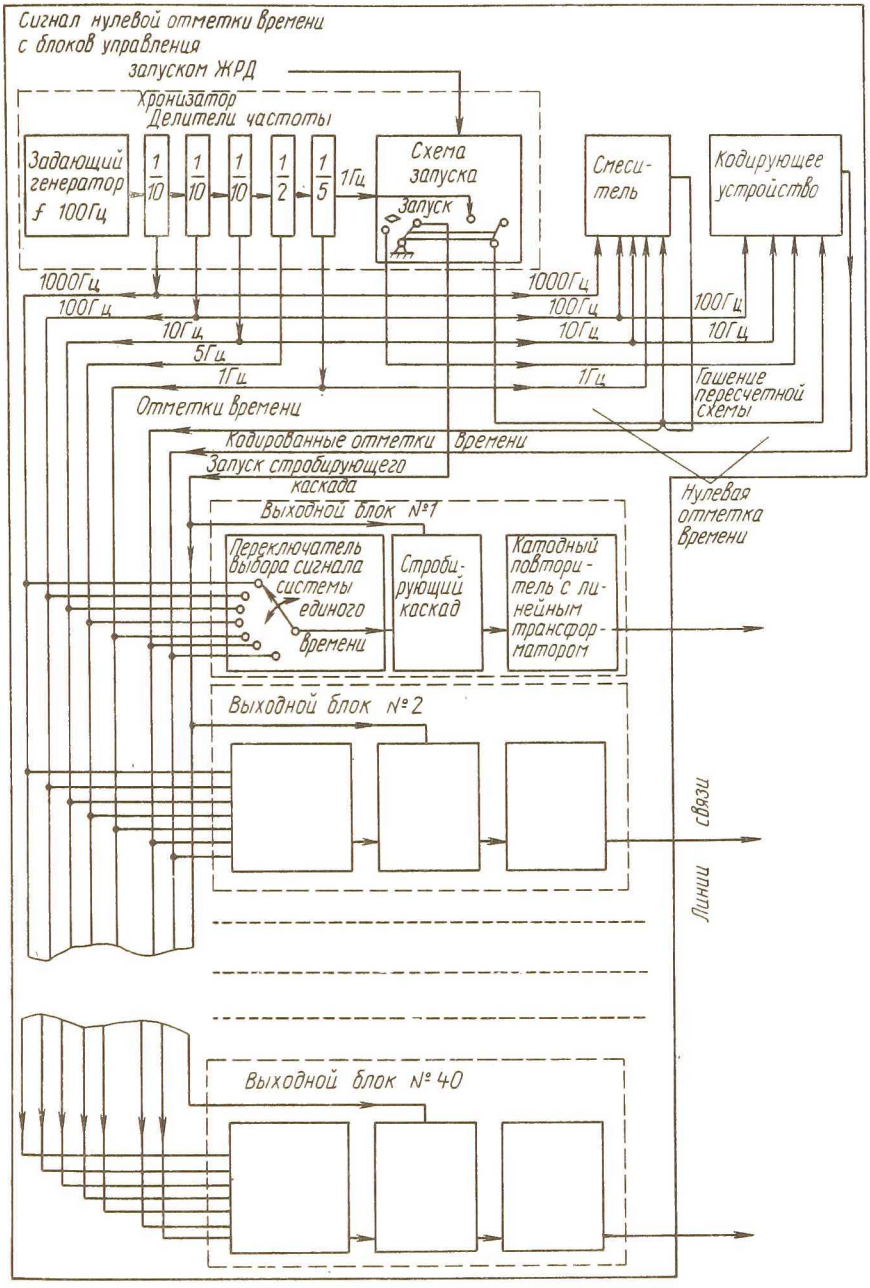


Рис. 4.61. Функциональная схема аппаратуры центрального поста системы единого времени



Рис. 4.62. Циклограмма работы системы единого времени

С м е с и т е л ь обеспечивает получение циклограммы выдачи на общую линию отметок времени, содержащих нулевую отметку времени и отметки четырех частот, соответствующих целым секундам (1 Гц), десятым (10 Гц), сотым (100 Гц) и тысячным (1000 Гц) долям секунды (рис.4.62). Наличие этих отметок значительно облегчает операцию расшифровки.

К о д и р у ю щ и е у с т р о й с т в а предназначены для формирования импульсов в двоичном коде, соответствующем текущему значению времени при нулевой отметке времени.

В ы х о д н ы е б л о к и служат для выбора частоты сигнала того или иного регистратора, отпирания линии связи по сигналу нулевой отметки времени и согласования выхода аппаратуры центрального поста с линией связи.

Аппаратура приемных постов состоит из линейных трансформаторов и согласующих устройств, усиливающих и формирующих импульс перед записью на носителе регистратора. Некоторые типы регистраторов, например магнитные дискретные регистраторы, имеют собственные системы генерации импульсов времени, запуск которых осуществляется также от системы единого времени по сигналу нулевой отметки времени. Точность системы единого времени очень высока и позволяет дифференцировать зарегистрированные процессы с интервалом менее 0,001 с.

4.6. ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

4.6.1. Информативность систем

Задачи, решаемые при испытаниях ЖРД, требуют высокой точности определения как средних значений параметров, так и их мгновенных значений. Это прежде всего относится к параметрам, определяющим энергетическое состояние ЖРД: давлению, температуре, скорости движения компонентов топлива в узлах и магистралях ДУ, тяге, развиваемой ЖРД, силовому нагружению конструкции. Ранее отмечено, что ни один канал измерения, исключая канал измерения частоты вращения ротора ТНА, не может одновременно иметь высокую статическую и динамическую точность. В связи с этим при испытаниях решают ряд методических и технических задач получения необходимой информации для полного и объективного анализа процессов, происходящих в ЖРД. Как правило, решение всех задач сводится к повышению информативности измерений. Остановимся на некоторых примерах.

При измерении давления на входе в насос ТНА нужно иметь в виду, что изменение этого параметра при работе ЖРД имеет колебательный характер (рис.4.63). По команде на запуск ЖРД К1 из-за увеличения скорости течения компонента топлива в питающей магистрали статическое давление на входе в насос уменьшается и затем развивается переходный процесс, сопровождающийся затухающими колебаниями с частотой, определяемой геометрией питающей магистрали и скоростью распространения звука в системе трубопровод–жидкость.

Экстремальные значения давления $p_{\min 1}$ и $p_{\max 1}$ должны быть точно определены для расчета кавитационного запаса насоса и силового нагружения на элементы конструкции магистрали и корпуса насоса. Необходимо также точное определение среднего давления p_1 для расчета действительных потерь статического давления в трубопроводе подачи компонента топлива от бака до входа в насос. Те же задачи решают и при выходе ЖРД на основной режим, после подачи команды К2, при работе на этом режиме и режиме выключения (команда К3). При этом необходимо точно определить мгновенные значения давления $p_{\min 2}$, $p_{\max 2}$ и среднее давление p_2 на участках установившегося режима.

Очевидно, для того чтобы получить необходимую информацию с достаточной точностью, следует воспользоваться методическим приемом –

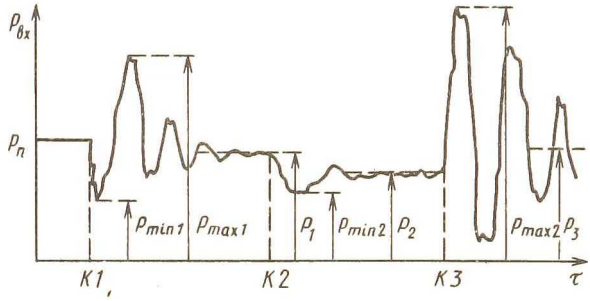


Рис. 4.63. График изменения давления $p_{вх}$ на входе в насос ТНА

одновременным измерением по двум каналам одного и того же параметра – давления на входе в насос. Один из этих измерительных каналов должен обладать высокой статической точностью измерения установившегося давления, например манометром высокого класса, а другой – высокой динамической точностью измерения тензометрическим преобразователем давления, установленным непосредственно в топливной магистрали.

Для коррекции показаний тензометрического преобразователя, обладающего такими погрешностями, как нестабильность чувствительности и нулевого уровня, можно воспользоваться точно определенными по манометру давлениями $p_п$, p_1, p_2, p_3 на установившемся режиме. Они могут быть использованы как эталонные точки для построения переменных по времени работы ЖРД градуировочных зависимостей динамического канала измерений. Такой методический прием значительно снижает погрешность определения p_{min1}, p_{max1}, p_{min2}, p_{max2}.

При измерении тяги следует помнить, что она при работе двигателя меняется (рис.4.64), где τ_4 – длительность импульса последействия. В интервале времени выхода ЖРД на режим про-

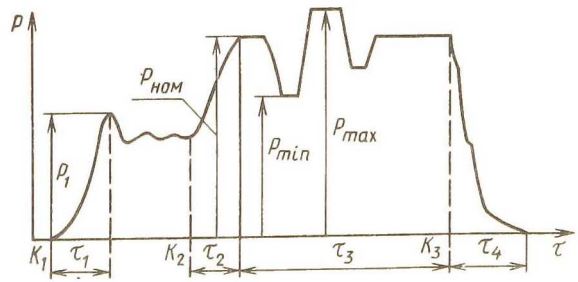


Рис. 4.64. График изменения тяги ЖРД: К1, К2, К3 – команды на изменение режима

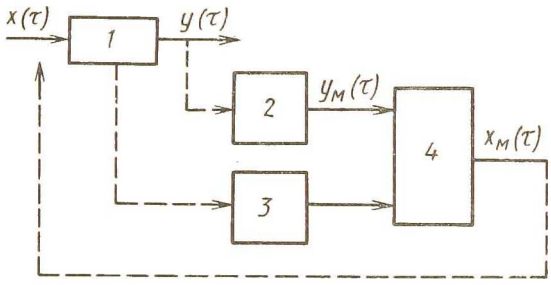


Рис.4.65. Алгоритм восстановления информации:
1 – канал связи; 2 – блок обработки $y(\tau)$; 3 – блок обработки динамических характеристик канала связи; 4 – блок восстановления сигнала $x_м(\tau)$; $y_м(\tau)$ – модельные сигналы $x(\tau)$, $y(\tau)$

межуточной ступени очень важно точно определить максимальное значение тяги P_1 в момент ее увеличения и скорость нарастания тяги $\frac{dP}{d\tau}$ на интервале времени τ_1. Необходимо также точно знать характер изменения P на интервале времени перехода ЖРД с режима промежуточной ступени на основной режим (интервал τ_2), импульс последействия ЖРД $\int_{\tau_4}^{\tau} P(\tau)d\tau$ и параметры свободных и вынужденных колебаний тяги на основном режиме (интервал времени τ_3). Эту информацию можно получить только с помощью высокоточного динамического канала измерения.

В то же время большое значение для оценки работоспособности ЖРД имеет точное определение $P_{ном}$, P_{min}, P_{max}. Без этой информации невозможно оценить точность настройки, параметры работы системы управления ЖРД. Получить эти данные можно, только используя канал измерения тяги, обладающий высокой статической точностью. В этом примере, как и в предыдущем, проблему увеличения точности решают методом параллельных измерений, установкой для измерения тяги одновременно тензометрического преобразователя и весовой головки. Следует иметь в виду, что при методе измерения тяги с использованием тензометрических преобразователей проводят динамическую коррекцию (восстановление) информации.

Исходную информацию по зарегистрированному на выходе измерительной системы сигналу восстанавливают согласно алгоритму, приведенному на рис.4.65. Динамические искажения сигнала $x(\tau)$ в измери-

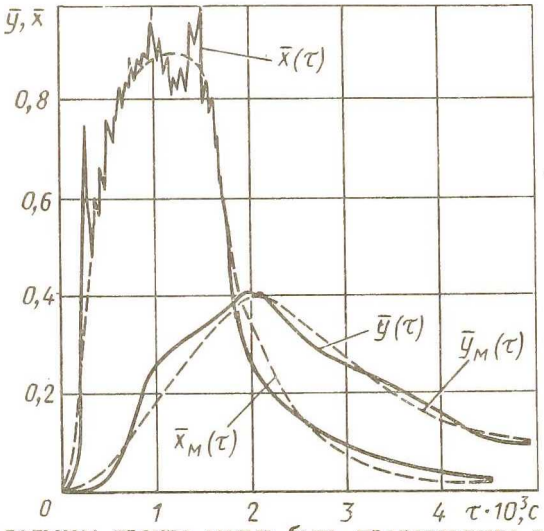


Рис. 4.66. Графики восстановления импульса тяги ЖРД с вытеснительной подачей топлива: $y_м(\tau)$ – сигнал $\bar{y}(\tau)$ аппроксимированный нормированный; $\bar{x}_м(\tau)$ – восстановленный сигнал

тельном тракте могут быть представлены в виде операционного преобразования во временной или частотной областях в зависимости от решаемой задачи. Зарегистрированный сигнал $y(\tau)$ обрабатывают с учетом определенных заранее передаточных свойств канала измерения на основе того или иного алгоритма восстановления. Как видно из примера реализации этой операции для импульса тяги ЖРД с вытеснительной подачей топлива (рис.4.66), приемы восстановления информации в значительной мере приближают полученный расчетным путем модельный сигнал $\bar{x}_м(\tau)$ к действительному сигналу $\bar{x}(\tau)$.

При использовании аналогичных методических приемов может быть значительно повышена информативность каналов измерений и других параметров ЖРД.

Возможно применение и некоторых технических приемов, снижающих погрешность измерений и, следовательно, повышающих их информативность. Большое значение в снижении погрешности измерения, особенно при динамических процессах, имеет разрешающая способность регистраторов как по отклонению параметров, так и по времени, а также оптимизация фильтрующих свойств измерительного канала.

Первая задача может быть решена увеличением числа сменных диапазонов чувствительности каналов усиления и регистрации, а также увеличением числа опросов в единицу времени для дискретных регистраторов или скорости протяжки для аналоговых регистраторов.

При решении второй задачи подбирают частотный диапазон электрического фильтра во вторичной преобразующей аппаратуре, выполняют

динамическую фильтрацию сигнала на входе в первичный преобразователь, а также разрабатывают алгоритм фильтрации или восстановления информации. Различные методы фильтрации сигнала по каналам измерения или уже полученной информации позволяют очистить полезный сигнал от высокочастотных или, наоборот, от низкочастотных составляющих, выделить для анализа сигнал интересующего спектра.

В задаче повышения информативности измерений большое значение имеют технические приемы, связанные с высокоточной аттестацией элементов канала измерений, которые приводят к уменьшению суммарной погрешности измерений. Задача минимизации погрешности сводится к тщательному метрологическому исследованию как первичных преобразователей, так и усилительной и регистрирующей аппаратуры. При автоматизированной обработке результатов испытаний необходимо исследовать погрешности, вносимые при вторичной обработке магнитограмм и осциллограмм на измерительно-вычислительных комплексах или специальных вычислительных устройствах.

4.6.2. Типовые структуры

В зависимости от конкретных задач, решаемых при испытании ЖРД, состав системы измерения может быть различен. Так, при опытной отработке или проведении программ специальных испытаний, как правило, системы ДУ оснащают множеством измерительных средств для получения наиболее полной информации о процессах, происходящих в узлах и магистралях ЖРД, в элементах стендовых систем. При проведении испытаний в серийном производстве число измерений уменьшается до минимально необходимого для осуществления текущего контроля надежности и определения основных параметров, определяющих тактико-технические характеристики ЖРД. Объем измерений при испытаниях ЖРД в серийном производстве обычно совпадает с объемом измерений при летно-конструкторских испытаниях или серийной эксплуатации ракетного комплекса (к последним измерениям не относятся измерения тяги, расходов компонентов топлива, измерения при некоторых частных программах тензометрирования, термометрирования элементов конструкции, измерения вибронагрузок).

Параметры ЖРД, измеряемые при различных видах испытаний, приведены в табл.4.2, в которой "С" обозначает статический канал измерения, "Д" – динамический канал измерения; "+" канал измерения, имеющий одновременно высокую статическую и динамическую точность, прочерк – отсутствие измерения.

Таблица 4.2

Параметры, команды	Доводочные испытания		Испытания в серийном производстве	Летно-конструкторские испытания	Серийная эксплуатация
	штатные	специальные			
Тяга	С, Д	С, Д	С, Д	–	–
Давление в камере	С, Д	С, Д	С, Д	С, Д	С, Д
Расходы компонентов топлива в ЖРД	С	С, Д	С	–	–
Расходы компонентов топлива в линиях регулирования	С	С, Д	–	–	–
Расход газов на наддув	С	С	–	–	–
Расход газа на продувку	С	С	–	–	–
Давление наддува в топливных баках	С	С	С	С	С
Давление компонентов топлива на входе в ЖРД	С, Д	С, Д	С, Д	С, Д	С, Д
Давление компонентов топлива за насосами	С	С, Д	С	С	С
Давление газа в газогенераторе	С	С, Д	–	–	–
Давление газа после турбины	С	С, Д	С	–	–
Давление в линиях регулирования	С	С, Д	С	С	С
Давление компонентов в полостях камеры	С	С, Д	С	С	–
Давление на срезе сопла	С	С	С	–	–
Давление газа в линии продувки	С	С	С	С	С
Параметры, определяющие положение регулирующих органов	+	+	+	+	+

Параметры, команды	Доводочные испытания		Испытания в серийном производстве	Летно-конструкторские испытания	Серийная эксплуатация
	штатные	специальные			
Сила тока в элементах управления и регулирования	+	+	+	+	–
Параметры срабатывания органов управления	+	+	+	+	+
Температура компонентов топлива в баках	С	С	С	С	С
Температура компонентов топлива на входе в ЖРД	С	С, Д	С	С	С
Температура компонентов топлива за насосами	С	С	–	–	–
Температура газа за турбиной	С, Д	С, Д	С	С	С
Температура компонентов топлива в полостях головки камеры	С	С	С	С	–
Температура газа наддува	С	С	С	С	С
Температура окружающей среды	С	С	С	С	–
Температура элементов ЖРД	С	С	С	С	С
Уровень компонентов топлива в баках	С	С	С	С	С
Сплошность компонентов на входе в ЖРД	–	+	–	–	–
Частота вращения ротора ТНА	+	+	+	+	+
Вибрации на корпусе камеры сгорания	Д	Д	Д	Д	Д
Вибрации на корпусе газогенератора	Д	Д	Д	Д	Д

Продолжение табл. 4.2

Параметры, команды	Доводочные испытания		Испытания в серийном производстве	Летно-конструкторские испытания	Серийная эксплуатация
	штатные	специальные			
Вибрации на корпусе ТНА	Д	Д	Д	Д	–
Вибрации органов управления и регулирования	Д	Д	–	–	–
Вибрации на раме ЖРД	Д	Д	–	Д	–
Вибрации на элементах системы измерения	–	Д	–	–	–
Параметры деформации и напряжения в элементах ЖРД	С, Д	С, Д	–	–	–

Контрольные вопросы

1. Перечислите особенности процесса измерения при испытаниях ЖРД.
2. Какие параметры ЖРД необходимы для анализа результатов его испытаний?
3. Какие средства измерений применяют для определения силы, давления, расхода, частоты вращения, вибраций, положения органов регулирования при испытаниях ЖРД?
4. Какова типовая структура канала измерений?
5. Какие требования предъявляют к первичным преобразователям при испытаниях ЖРД?
6. Какие средства регистрации информации используют при испытаниях ЖРД?
7. В чем принципиальная разница между аналоговыми и дискретными средствами регистрации? Дать их сравнительную оценку.
8. Какие приемы используют для повышения информативности каналов измерений?

Глава 5

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ, СТЕНДЫ И УСТАНОВКИ

5.1. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

Комплекс сооружений, оснащенных специальным оборудованием, обеспечивающим проведение испытаний ЖРД для определения их основных параметров и характеристик, называют испытательным комплексом или истытательной станцией.

В состав испытательных комплексов входят: стенды для установки и испытания ЖРД; наблюдательные бункеры, из которых управляют процессом испытаний; топливные системы для хранения и подготовки компонентов топлива; химические, измерительные, вычислительные и другие лаборатории; производственные и приборные мастерские; монтажные помещения для проведения работ с ЖРД до и после испытания; различные энергетические системы для обеспечения стендов и производственных служб водой, паром, воздухом и инертными газами требуемых параметров; административные и бытовые помещения, а также вспомогательные службы (ремонтные, транспортные и т.д.).

Состав комплекса во многом зависит от того, какой вид компонентов топлива применяют при испытании ЖРД. Топлива, кипящие при низких температурах, невыгодно перевозить на большие расстояния из-за больших потерь на испарение, поэтому в состав испытательного комплекса включают цехи или заводы по их производству. Применение высокотоксичных компонентов топлива обусловливает увеличение мощности систем водоснабжения и вентиляции комплекса, необходимость его оборудования системами дожигания и нейтрализации продуктов сгорания, а также принятие особых мер по обеспечению общей и индивидуальной защиты обслуживающего персонала.

На испытательных комплексах кроме стендов для испытания полноразмерных ЖРД часто имеются установки для автономных испытаний его агрегатов или стендовой арматуры, а также для проливки и градуировки расходомерных устройств на рабочих компонентах топлива.

К испытательным комплексам предъявляют следующие требования по обеспечению:

возможности проведения испытаний в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным;

соответствия строительных сооружений необходимому для проведения испытания оборудованию;

возможности проведения испытаний в любых атмосферных и климатических условиях;

возможности автоматизации управления испытаниями, измерения необходимых параметров и обработки информации;

возможности быстрого восстановления элементов стенда и его систем при аварийном исходе испытания;

универсальности и перспективности;

необходимой вентиляции служебных помещений и территории в целом, глушении шума работающих ЖРД, нейтрализации и удаления продуктов сгорания;

безопасности работы, удобства эксплуатации и необходимых бытовых условий.

В зависимости от целей проводимых испытаний комплексы подразделяют на опытные и серийные. Опытные комплексы отличаются повышенным числом измеряемых параметров испытываемых объектов и повышенной точностью их измерения.

Территория, занимаемая испытательным комплексом, определяется числом стендов для автономных испытаний, тягой испытываемых ЖРД и характером используемых компонентов топлива, а территория, занимаемая серийными комплексами, – еще и производственной программой.

Испытательные комплексы оборудуют сетью автомобильных и железнодорожных подъездных путей, а особо крупные комплексы, предназначенные для испытания ЖРД в составе ракетной ступени, могут иметь и систему водных каналов. Комплексы для испытаний ЖРД как предприятия, характеризующиеся значительным уровнем шума и токсичностью, взрыво- и огнеопасностью, сооружают обычно вдали от населенных пунктов на свободных территориях значительной площади.

5.2. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ СТЕНДЫ И НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ БУНКЕРЫ

Сооружение, предназначенное для подготовки и проведения огневых испытаний ЖРД или его агрегатов в условиях, приближающихся к эксплуатационным, оснащенное специальными системами, обеспечивающими работу ЖРД и контроль его параметров, называют испытательным стендом (рис.5.1).

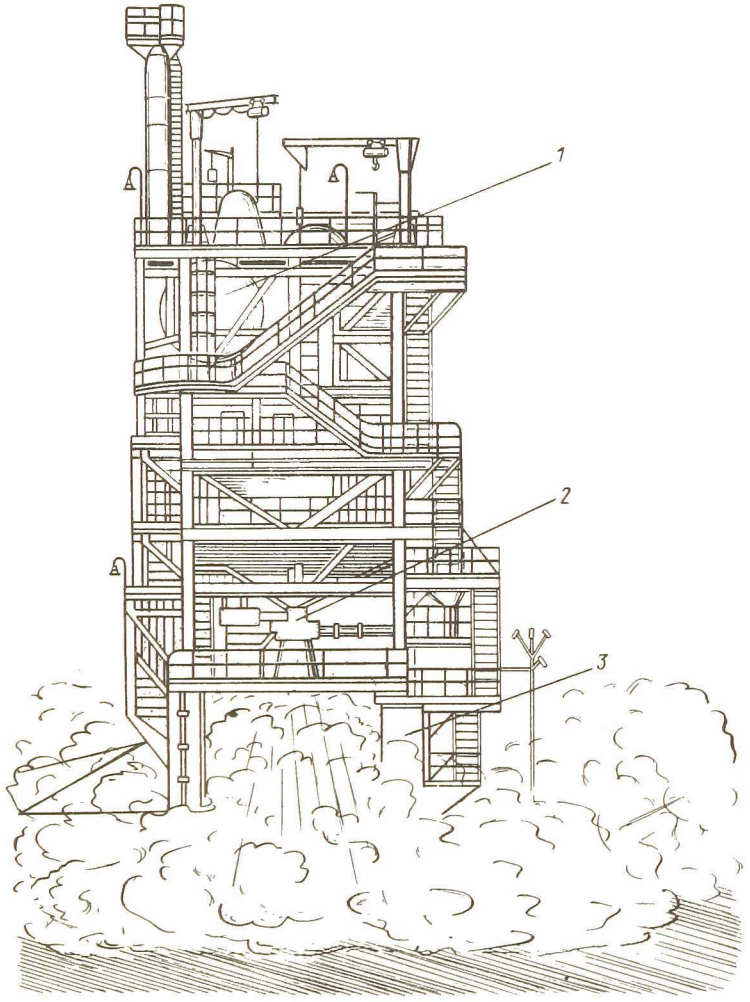


Рис. 5.1. Испытательный стенд:
1 – бак топливный; 2 – ЖРД; 3 – лоток

Конструкция стенда должна обеспечивать возможность проведения испытаний ЖРД определенного класса, определяемого его тягой и видом топлива. Наряду с этим должна быть предусмотрена возможность модернизации стенда для проведения испытаний ЖРД больших тяг, работающих на более энергетически эффективных топливах, т.е. стенд с учетом его значительной стоимости должен быть рассчитан на перспективу.

В зависимости от цели испытаний стенды подразделяют на опытные и серийные. Опытные стенды, предназначенные для испытаний опытных ЖРД, оборудованы более универсальными системами, обеспечивающими проведение испытаний ЖРД различных модификаций, контроль и измерение значительного числа параметров.

По назначению испытываемых ЖРД стенды делят на наземные, предназначенные для испытаний ЖРД первых ступеней ракет или ЖРД верхних ступеней без прямого измерения тяги, так как сопло работает в нерасчетном режиме; высотные, позволяющие обеспечить необходимую степень расширения газа в сверхзвуковом сопле; морские, позволяющие имитировать условия подводного запуска.

Одной из разновидностей наземных стендов являются стенды для испытания ЖРД в составе ракетной ступени. Такие испытания особенно важны, если ДУ состоит из нескольких ЖРД.

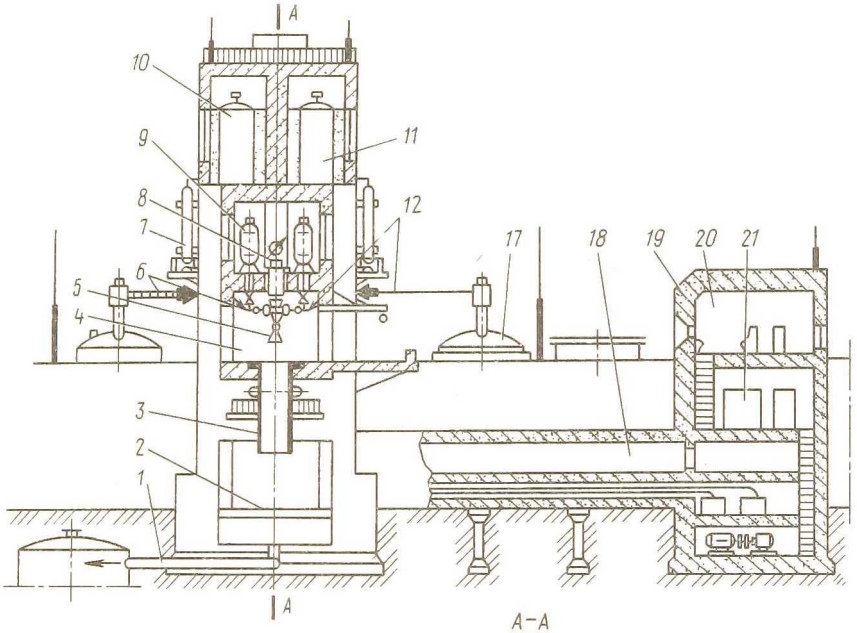
По роду используемых компонентов стенды подразделяют на криогенные и кислотные. На криогенных стендах должна быть обеспечена теплоизоляция баков и топливных магистралей. Стенды должны быть оснащены системой эжектирования и вакуумирования баков, системой циркуляции. На кислотных стендах необходимы устройства для нейтрализации продуктов сгорания и охлаждающей воды, мощные системы вентиляции и водоснабжения.

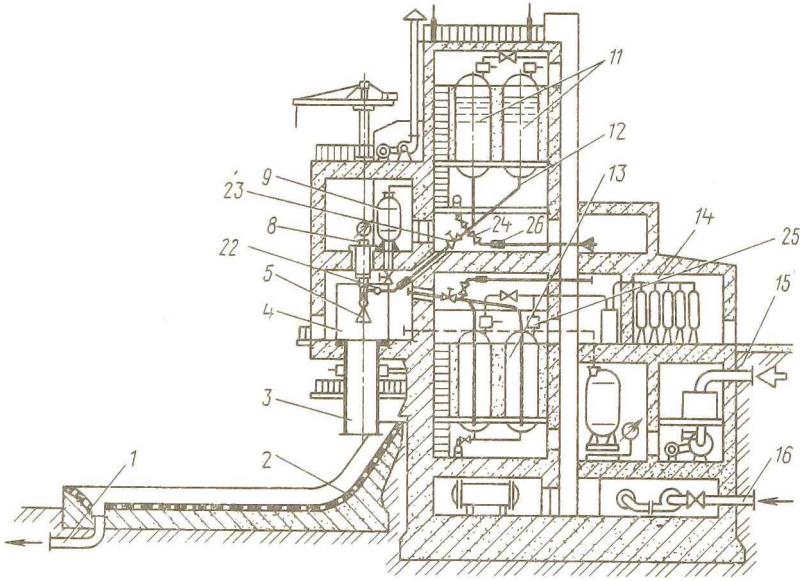
По способу подачи компонентов стенды делят на вытеснительные и турбонасосные.

Стенды различают также по значению допускаемой тяги испытываемых ЖРД.

Из-за возможности аварийного исхода испытаний ЖРД вне зависимости от их мощности и характера компонентов топлива в период испытаний обслуживающий персонал на стенд не допускается. Управление

Рис. 5.2. Конструктивная схема вертикального стенда:
1 — труба; 2 — лоток; 3 — труба газоотводная; 4 — бокс; 5 — ЖРД; 6, 12 — система питания ЖРД; 7 — баллон со сжатым газом; 8 — устройство тягоизмерительное; 9 — емкость разделительная; 10, 11 — баки топливные расходные; 13 — бак топливный дополнительный; 14 — баллонная; 15 — система отопления и вентиляции; 16 — система специальная; 17 — топливохранилище; 18 — тоннель; 19 — бункер наблюдательный; 20 — пультовая; 21 — система измерения; 22 — измеритель расхода турбинного типа; 23 — клапан отсечной; 24 — вентиль; 25 — электропневмоклапан; 26 — фильтр топливной магистрали


A
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
11
12
17
18
19
20
21
A
А–А


11
12
13
9
23
8
22
5
4
3
2
1
24
26
14
25
15
16

испытаниями, наблюдение за ними и дистанционный контроль основных параметров ЖРД и стендовых систем осуществляют из наблюдательного бункера.

Для ЖРД сравнительно малых тяг (до 200 кН) наблюдательный бункер может быть размещен в отдельном строительном сооружении, в помещении, отделенном от стенда перегородкой, обеспечивающей шумоизоляцию, защиту от проникновения паров компонентов топлива и газообразных продуктов сгорания. На станциях, предназначенных для испытания более мощных ЖРД, бункер выполняют в виде отдельного сооружения, отстоящего от стенда на расстояние до 100 м (в зависимости от тяги испытываемых ЖРД). В этом случае стенд и бункер соединяют специальным подземным тоннелем (рис.5.2), в котором проложены электрокабели, соединяющие регистрирующие приборы с преобразователями системы измерения, установленными на ЖРД и стендовых системах. Тягой ЖРД определяются размеры огневого бокса стенда, емкость топливных баков, конструкции систем охлаждения и нейтрализации продуктов сгорания и др.

По расположению оси ЖРД во время испытаний стенды делят на горизонтальные, наклонные и вертикальные.

На горизонтальных стендах испытывают ЖРДМТ. Преимущество таких стендов – отсутствие необходимости оборудования их специальными устройствами для отвода продуктов сгорания. Их недостаток – опасность взрыва компонентов топлива, накопившихся в камере вследствие задержки воспламенения при запуске, а также наличие остатков топлива в камере сгорания после останова.

На наклонных стендах камера сгорания находится при испытании под углом к горизонтали, примерно равным половине угла, который образует касательная к стенке сопла в сужающейся части с его осью. У наклонных стендов отсутствуют недостатки, присущие горизонтальным стендам, а стоимость их ниже, чем стоимость вертикальных стендов.

Вертикальный стенд наиболее предпочтителен для испытания ЖРД первой ступени ракеты и испытаний их в составе ракетной ступени, которые полнее имитируют условия запуска.

Рассмотрим состав вертикального стенда и наблюдательного бункера, предназначенных для проведения испытаний мощных ЖРД. Стенд представляет собой корпус из монолитного железобетона с мощным стальным каркасом, расположенный на склоне глубокого оврага. Каркас рассчитывают обычно на нормальную статическую нагрузку, определяемую максимально допустимой тягой, и на статическую боковую

нагрузку, равную примерно 10 % тяги. Для безопасности каркас рассчитывают с запасом прочности, равным 3. Все помещения стенда, за исключением бокса 4, закрытого типа. Для выхода взрывной волны на стенде имеются легкоразрушаемые элементы – большие окна, легкие крыши боксов и т.д.

Основным помещением стенда является бокс (огневой отсек), расположенный консольно по отношению к корпусу. Бокс имеет откатной пол и откатные ворота с трех сторон. Обычно уровень пола бокса принимается за нулевую отметку. Этажи выше этого уровня принято отмечать "плюс 10", "плюс 15" и т.д., а ниже – "минус 5", "минус 15" и т.д. Цифры обозначают расстояние от нулевой отметки до пола этажа. В боксе ЖРД 5 монтируют на раме тягоизмерительного устройства 8. Доставка ЖРД в бокс осуществляется на специальной транспортировочной тележке по рельсовому пути или на тельфере по монорельсу.

Применяют две компоновки корпуса стенда: с центральным расположением рельсовых путей по транспортному коридору внутри корпуса и с боковым расположением рельсовых путей по балкону снаружи корпуса. Боковое расположение рельсовых путей позволяет полнее использовать внутренние помещения корпуса для размещения оборудования.

Над боксом расположена система измерения тяги ЖРД и ее градуировки. Сила на эту систему передается от рамы тягоизмерительного устройства посредством вертикальных штанг, проходящих через окна в потолке бокса.

В верхней части стенда расположены отсеки горючего и окислителя, в которых размещены топливные расходные баки 10 и 11 с системами термостатирования и системы 6, 12 питания ЖРД. Рядом находятся баллоны 7 со сжатым газом для наддува топливных баков. Для обеспечения гидродинамического подобия в отсеке тягоизмерительного устройства расположены взаимоизолированные разделительные емкости 9.

Ниже нулевой отметки размещены дополнительные топливные баки 13, предназначенные для обеспечения возможности проведения опытных работ на новых, более перспективных компонентах. Наддув баков осуществляется из баллонной 14. Обычно ниже нулевой отметки расположена также измерительная, где сосредоточиваются средства измерения и некоторые регистрирующие устройства (кино- и фотокамеры, преобразователи).

Под боксом находится система отвода продуктов сгорания, состоящая из газоотводной трубы 3, предназначенной для гашения световой

и звуковой энергии струи (на месте трубы может быть выходной диффузор для обеспечения высотных условий), и лотка 2 для отведения раскаленной газовой струи от стенда при одновременном ее охлаждении. Необходимость этого вызвана опасностью разрушений нижней части стенда вследствие эрозии и теплового воздействия струи, обладающей значительной кинетической энергией.

Лоток 2 состоит из наклонной отбойной стенки, горизонтальной части, системы подачи охлаждающей воды, системы сбора и отвода отработанной воды. Струя газов из сопла и лоток охлаждаются водой из специальной системы 16. Слив загрязненной отработанной воды и жидких технологических отходов в нейтрализационную систему производится по трубе 1.

Выполняется лоток из монолитного железобетона, облицованного массивными чугунными плитами. Отбойная стенка защищается от перегрева специальной системой, представляющей собой батарею труб, в которую из коллектора подается вода. Для впрыска воды в газовую струю в трубах просверлены отверстия.

В вертикальном стенде расстояние бокса от поверхности лотка должно быть не менее длины видимой части факела, которая составляет 25...30 диаметров сопла. Можно использовать и эмпирическую зависимость

$$L_{ф} = (0{,}04...0{,}045)\sqrt{P},$$

где $L_{ф}$ – длина факела, м; P – тяга, Н.

Ниже нулевой отметки стенда расположены помещения, в которых размещаются системы 15 отопления и вентиляции, связи и оповещения, пожаротушения. На некотором удалении от стенда размещены топливохранилища 17.

Испытанием управляют из наблюдательного бункера 19, представляющего собой отдельное сооружение, удаленное от стенда на расстояние, которое устанавливают в зависимости от тяги испытываемого ЖРД. Визуальное наблюдение за ходом испытания осуществляют через специальные окна с бронестеклами, перископические устройства или по телевизору из пультовой 20. Применение телевизоров для наблюдения оправдано не только вследствие значительного удаления их от бокса, но также потому, что при неблагоприятном направлении ветра бокс может быть закрыт от наблюдателя парами воды, подаваемой на охлаждение лотка. При этом наблюдение за работой ЖРД можно вести

только посредством телекамер, смонтированных в боксе, и телевизоров, установленных в бункере.

В бункере размещены пульты управления испытаниями, регистрирующие приборы системы измерения 21 (осциллографы, самописцы, блоки магнитной записи и т.п.) и лаборатория для обработки фотоматериалов. Команды из бункера на стенд и информация со стенда в измерительную передаются по кабельным каналам связи, расположенным в тоннеле 18.

5.3. ТОПЛИВНАЯ СИСТЕМА СТЕНДА

Топливная система стенда – это специальное оборудование, предназначенное для хранения, подготовки и подачи топлива с заданными параметрами к испытываемому изделию.

В состав топливной системы входят: топливные баки с системами заправки и слива, наддува и дренажа, термостатирования, вакуумирования и эжектирования; топливные магистрали, основными элементами которых являются трубопроводы, расходные, пусковые, дренажные, отсечные и другие клапаны, сильфоны, фильтры, байпасные линии и линии циркуляции, разделительные емкости, демпфирующие и бустерные устройства.

Параметры топливной системы (объемы баков, температура и давление компонентов топлива, длина и диаметр трубопроводов) зависят от мощности испытываемого ЖРД, вида испытаний и применяемых компонентов топлива. Характеристики компонентов топлива и ТУ на испытания определяют температурный диапазон, который должна обеспечивать топливная система. Так, для проверки возможности работы ЖРД в различных климатических условиях на стенде проводят испытания в широком диапазоне температур компонентов топлива, например для керосина – от +50 до –50 °С, для жидкого кислорода – от –180 до –200 °С.

Длина стендовых магистралей ввиду необходимости удаления топливных баков от бокса значительна (на стенде для испытания ЖРД с тягой порядка $2 \cdot 10^6$ Н – около 20 м). Диаметры стендовых магистралей для подачи компонентов топлива к ЖРД определяют исходя из секундного расхода топлива и приемлемой скорости потока, которая обычно составляет 5...7 м/с (при больших скоростях увеличиваются гидравлические потери давления в магистралях и гидроудары при закрытии топливных клапанов). Если в качестве рабочего тела исполь-

зуют водород, то ввиду малой плотности допустимая скорость может составлять 25 м/с.

К топливной системе предъявляют следующие требования:

хранение компонентов топлива в стендовых баках при задержке испытания;

подготовка и термостатирование компонентов топлива;

подача к ЖРД топлива компонентов с определенным давлением, температурой и расходом в течение заданного времени;

измерение расхода с необходимой точностью (погрешность не должна превышать 0,4 %);

герметичность всех элементов;

материалы элементов не должны вступать в реакцию с рабочей средой;

удобство эксплуатации (осмотра фильтров, расходомеров и т.д.).

Топливные системы можно классифицировать:

по давлению подачи – системы высокого и низкого давления (для испытания ЖРД с ТНА);

по роду применяемого топлива – системы для криогенных компонентов, для высококипящих компонентов и для агрессивных компонентов.

Давление $p_б$ в баке топливной системы высокого давления подсчитывают по формуле

$$p_б = p_к + \Delta p_ф + \Delta p_{маг} - \Delta p_Н, \qquad (5.1)$$

где $p_к$ – давление в камере сгорания; $\Delta p_ф$ – потери давления в форсуночной головке; $\Delta p_{маг}$ – потери давления в магистрали; $\Delta p_Н$ – давление столба жидкости.

В топливной системе низкого давления

$$p_б = p_{вх.н} + \Delta p_{маг} - \Delta p_Н, \qquad (5.2)$$

где $p_{вх.н}$ – давление на входе в насос.

Потери давления в магистрали

$$\Delta p_{маг} = \Delta p_{тр} + \Delta p_{мест},$$

где $\Delta p_{тр}$ – потери давления на трение; $\Delta p_{мест}$ – потери давления, связанные с местными условиями течения (повороты, тройники и т.д.).

Потери давления на трение в магистрали

$$\Delta p_{тр} = \lambda \frac{l}{d} \rho \frac{c^2}{2}, \qquad (5.3)$$

где $\lambda = f(\mathrm{Re}, c)$ – коэффициент трения; l – длина магистрали; d – диаметр магистрали; ρ – плотность топлива; c – скорость потока; Re – число Рейнольдса.

Местные потери давления

$$\Delta p_{мест} = \xi \rho c^2/2, \qquad (5.4)$$

где ξ – коэффициент потерь.

Коэффициенты λ и ξ могут быть найдены по графическим зависимостям.

В конструкции магистрали необходимо предусмотреть высшую точку для стравливания газовых пузырей и низшую – для слива, нельзя допускать тупиковых зон, так как там возможно образование газовых пузырей, которые при работе могут попасть в ЖРД.

Топлива, применяемые для ЖРД, в основном являются агрессивными жидкостями, поэтому для изготовления магистралей используют соответствующие материалы, например коррозионно-стойкую сталь. Для криогенных компонентов топлива применяют коррозионно-стойкую сталь, обладающую большой вязкостью и высокой прочностью при низких температурах. Топливная система для криогенных компонентов должна иметь необходимую теплоизоляцию стекловатой, асбестом или вакуумную теплоизоляцию (давление в рубашке равно $1{,}3 \cdot 10^2$ Па или менее).

5.3.1. Топливные баки

Емкость, предназначенная для хранения, подготовки и подачи топлива с определенными параметрами в топливные магистрали, называется топливным баком. Конструкция топливных баков зависит от рода применяемого топлива.

В зависимости от способа подачи компонентов топлива в камеру сгорания ЖРД баки подразделяют на два основных типа:

нагруженные, с высоким давлением наддува, применяемые при вытеснительной системе подачи;

разгруженные, с низким давлением наддува, применяемые в системах подачи топлива с ТНА.

Давление в разгруженных баках определяется условиями бескавитационной работы ТНА ЖРД и равно 0,5...1 МПа.

Материал топливных баков должен быть коррозионно-стойким и не вступать в реакцию с применяемым топливом. Баки оборудованы горловинами, штуцерами и фланцами для стыковки с заправочными и расходными магистралями, подсоединения трубопроводов перелива, наддува и дренажа. В них имеются люк для осмотра и ремонта, а также места для установки преобразователей давления, температуры и уровня топлива. Наиболее распространенной формой баков является цилиндрическая, так как она позволяет получить довольно большой объем при сравнительно небольшом поперечном сечении. Находят применение и сферические баки, которые имеют наименьшее отношение площади поверхности к объему, что особенно важно при использовании криогенных компонентов топлива. Баки для криогенных компонентов топлива должны быть изолированы стекловатой или их стенки должны быть двойными с вакуумной изоляцией. Вакуумный насос откачивает воздух из полости между стенками бака до давления $1{,}3 \cdot 10^2$ Па и менее.

Одним из наиболее важных элементов топливного бака является заборное устройство. Забор топлива выполняется так, чтобы избежать неравномерного понижения уровня, воронкообразования и кавитации, которая возникает при снижении статического давления жидкости ниже давления насыщенных паров из-за увеличения скорости потока в заборном устройстве. Исключить кавитацию можно таким профилированием заборного устройства, при котором получают постоянное статическое давление по его длине.

При сливе топлива из бака над донным сливным отверстием при некотором критическом уровне жидкости $H_{кр}$ образуется воронка – понижается уровень на высоту h (рис.5.3). При этом в топливную магистраль может попасть газ и течение переходит в двухфазное, что очень опасно для ЖРД. Воронкообразование можно исключить с помощью воронкогасителей, устанавливаемых в заборном устройстве.

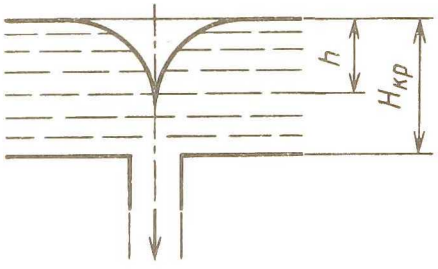


Рис.5.3. Схема слива топлива из бака

5.3.2. Трубопроводы

Трубопроводы предназначены для транспортирования рабочих тел (жидкостей и газов) от баков, насосов к потребителю. Они подвергаются действию статических и динамических нагрузок. К статическим нагрузкам относятся собственная масса трубопровода, масса транспортируемого рабочего тела и внутреннее давление. Динамические нагрузки возникают из-за пульсаций внутреннего давления, вибраций трубопровода и опор крепления.

Термические напряжения в трубопроводе возникают из-за колебаний температуры окружающей среды и транспортируемого по трубопроводу рабочего тела. При изменении температуры на Δt длина трубопровода l изменяется на $\Delta l = al\Delta t$, где a – коэффициент линейного расширения материала трубопровода. Для компенсации температурных деформаций трубопроводов применяют сильфоны.

Широкое распространение получили гибкие трубопроводы (шланги), применяемые там, где происходит значительное взаимное перемещение трубопроводов. Эти трубопроводы выполняют резиновыми, стальными, тефлоновыми (фторопластовыми). Наиболее применимы гибкие стальные трубопроводы с тонкостенной гофрированной оболочкой, снаружи которой выполнена силовая металлическая оплетка. Силовая оплетка предохраняет оболочку от разрушения и обеспечивает работоспособность трубопровода в поле переменных осевых и радиальных нагрузок.

Толщину стенки трубопровода δ определяют исходя из предельной нагрузки, в качестве которой принимают предельное внутреннее давление $p_{пред}$. Используя значение допускаемого напряжения $\sigma_{доп}$, полученного с учетом коэффициентов запаса прочности, толщину стенки бесшовного трубопровода определяют по формуле

$$\delta = \frac{p_{пред} d}{2\sigma_{доп} + p_{пред}} + c, \qquad (5.5)$$

где c – коэффициент, зависящий от предполагаемого коррозионного износа стенки трубопровода, а также от минусового допуска на толщину стенки; d – диаметр трубопровода.

Толщину стенки трубопровода с продольным швом рассчитывают с учетом коэффициента прочности φ:

$$\delta = \frac{p_{пред} d}{2\varphi\,\sigma_{доп} + p_{пред}} + c. \qquad (5.6)$$

В стендовых топливных магистралях в основном применяют цельнотянутые бесшовные трубопроводы. Для криогенных жидкостей трубопроводы выполняют теплоизолированными. Отдельные участки трубопроводов вместе с агрегатами объединяют в пневмогидравлическую систему разъемными фланцевыми соединениями.

5.3.3. Клапаны

В стендовых пневмогидравлических системах используют клапаны многоразового действия, пневмоклапаны, электромагнитные, гидравлические и ручные вентили. По назначению клапаны делят на запорные, предохранительные и регулирующие.

Запорные клапаны включают и отключают в заданное время соответствующий участок трубопровода. Они, как правило, имеют внешний привод и подразделяются на нормально открытые, нормально закрытые, нормально прикрытые. Наиболее распространены пневмоклапаны – агрегаты, управляемые сжатым газом, который подается с помощью электропневмоклапана. При подаче газа в управляющую полость запорный орган топливного пневмоклапана перемещается, закрывая (или открывая) проходное сечение в топливной магистрали. Стендовые пневмоклапаны, имеющие большой ресурс работы, иногда имеют два управляющих давления (две управляющие полости), обеспечивающих движение запорного органа при закрытии и открытии пневмоклапана. Такие пневмоклапаны называют пневмоклапанами двойного действия.

Для управления пневмоклапанами, а также в системах наддува и продувки используют клапаны с электромагнитным приводом, которые в обесточенном состоянии закрыты усилием пружины. При подаче напряжения на электромагнит якорь втягивается и поднимает шток с тарелью над седлом пневмоклапана, открывая его.

Предохранительные клапаны предотвращают повышение или понижение давления в системе за установленные пределы. Принцип действия этих клапанов основан на уравновешивании внешней силой (пружиной) давления среды, действующего на клапан, который под действием этой силы перекрывает проходное сечение. Одной из характеристик, определяющих качество клапанов на установившемся режиме, является чувствительность к изменениям давления $\vartheta = \Delta p/p_{ном}$, где Δp – превышение давления над номинальным значением $p_{ном}$. Чувствительность зависит от силы трения подвижных частей, от формы седла и конструкции запорного органа.

Регулирующие клапаны обеспечивают поддержание расхода рабочей среды или давления в магистралях в заданных пределах. Их выполняют в виде дроссельного устройства с регулируемой площадью отверстия для прохода рабочего тела. Регулирующие клапаны, предназначенные для понижения давления газа и обеспечения его постоянства в заданных пределах на выходе при изменении расхода и давления на входе, получили название редукторов. Понижение давления газа в редукторе происходит вследствие дросселирования потока при протекании его из полости высокого давления в полость низкого давления через проходное сечение малой площади, образованное клапаном и его седлом. Редукторы бывают прямого и обратного действия в зависимости от того, совпадают или нет направление движения клапана при открытии и направление силы, обусловленной высоким давлением газа.

5.3.4. Пневмогидравлическая схема топливной системы стенда

На рис.5.4. изображена пневмогидравлическая схема системы окислителя. Система окислителя (жидкого кислорода) включает расходные топливные баки 10, разделительную емкость 5, бустерную емкость 6, топливные магистрали и топливную арматуру, трубопроводы азота, воздуха и гелия. На рисунке изображены два топливных бака, но при проведении длительных испытаний параллельно может быть подключено необходимое число баков. Расходные баки имеют герметичную рубашку (двойные стенки), что позволяет использовать их для переохлаждения кислорода подачей жидкого азота в рубашку. Кроме того, переохлаждение окислителя возможно посредством отсоса газообразной фазы из верхней части бака с помощью эжектора 11.

Конструкцией баков предусмотрена возможность насыщения кислорода гелием при подаче его в бак по специальному трубопроводу 9 с отверстиями. К верхней части бака подсоединены трубопровод 7 наддува от системы наддува, трубопровод 8 дренажа и трубопровод сброса избыточного давления через предохранительный клапан 17. К нижней части бака подсоединен трубопровод заправки и расхода кислорода. В баке установлен зонд (емкостный или индуктивный) для измерения уровня окислителя и термозонд для определения температуры по высоте бака.

Для соблюдения гидродинамического подобия стендовой топливной магистрали объектовой на расходной магистрали устанавли-

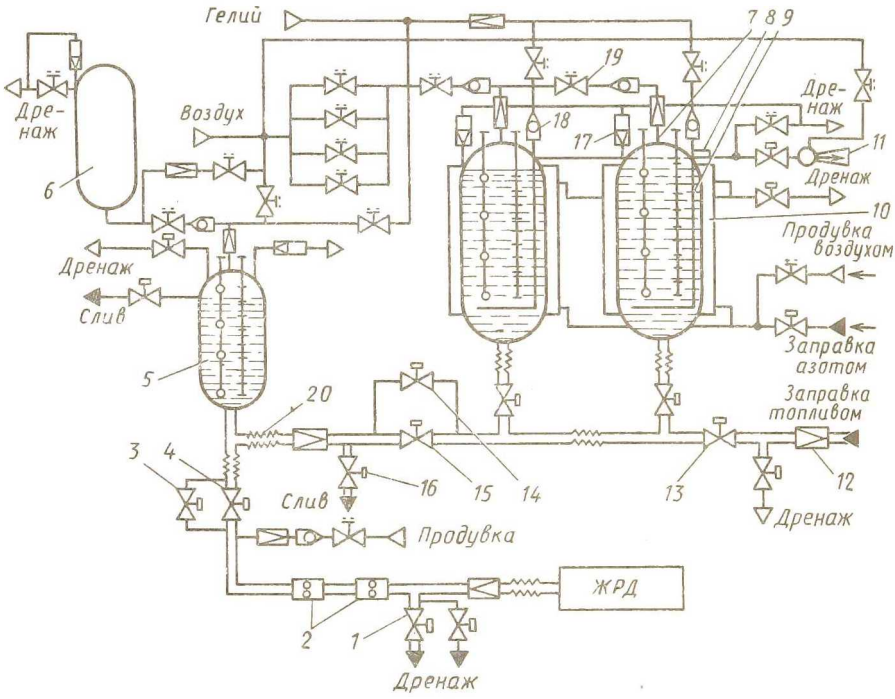


Рис. 5.4. Пневмогидравлическая схема топливной системы окислителя:
1, 16 — клапаны дренажные; 2 — расходомер; 3, 4, 13, 14, 15 — пневмоклапаны; 5 — емкость разделительная; 6 — емкость бустерная; 7, 8, 9 — трубопроводы; 10 — бак топливный; 11 — эжектор; 12 — фильтр заправочный; 17 — клапан предохранительный; 18 — клапан обратный; 19 — электропневмоклапан; 20 — сильфон

вают дополнительную разделительную емкость 5. Разделительная емкость теплоизолирована, оборудована термозондом и зондом, нижняя точка которого включена в систему управления для останова ЖРД при снижении уровня окислителя до этой точки. Наддув разделительной емкости производится воздухом или гелием непосредственно от системы наддува или через бустерную емкость 6, необходимую для демпфирования колебаний давления в подушке наддува в процессе работы.

На заправочной магистрали установлены заправочный фильтр 12, дренажный клапан для сбрасывания газа в начале заправки и заправочный пневмоклапан 13. На расходной магистрали установлены два фильтра: перед разделительной емкостью и непосредственно пе-

ред ЖРД. Для постепенного заполнения магистрали через расходный 15 и пусковой 4 пневмоклапаны имеются обводные линии с дополнительными пневмоклапанами 14 и 3 с меньшей площадью проходного сечения. Перед разделительной емкостью и ЖРД для стравливания газа и охлаждения магистралей установлены дренажные клапаны 16 и 1.

Для измерения расхода окислителя при работе ЖРД служат два расходомера 2 турбинного типа. Для исключения попадания влажного атмосферного воздуха в систему окислителя в период между испытаниями ЖРД предусмотрена продувка всей системы сухим сжатым воздухом под небольшим давлением ("вялая" продувка). Воздух поступает во все емкости и трубопроводы и выходит из него через штуцер на концевой заглушке магистрали в боксе. На рис.5.4 темные стрелки показывают направление движения жидкости, а светлые – газа.

5.4. ЗАПРАВКА ТОПЛИВНЫХ БАКОВ, ЗАПОЛНЕНИЕ РАСХОДНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ И ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В ТОПЛИВНЫХ МАГИСТРАЛЯХ ПРИ СРАБАТЫВАНИИ КЛАПАНОВ

Стендовые топливные баки заправляют из стационарных топливных хранилищ или передвижных топливозаправщиков. Заправочная магистраль должна иметь уклон в сторону хранилища, чтобы излишки топлива, не вошедшие в бак, стекали обратно в хранилище.

При заправке топлива газ вытесняется через дренажную систему, которая должна иметь достаточный для этого диаметр проходных сечений. Контроль заправки осуществляется первичными преобразователями уровня топлива в баках.

Заправочные магистрали криогенных топлив изолируют для уменьшения потерь при заправке. Заправка обычно производится передавливанием топлива в баки стенда путем создания избыточного давления в топливном хранилище. Для криогенных топлив избыточное давление может быть получено при испарении части топлива в теплообменнике и повышении давления в газовой подушке над поверхностью топлива в хранилище. Перед заправкой криогенных топлив заправочную магистраль и топливный бак необходимо охладить до температуры криогенной жидкости, чтобы в процессе заправки поддерживалось однофазное состояние топлива. В изолированных заправочных магистралях при срав-

нительно небольшой скорости заправки потери на испарение определяются количеством теплоты, отданным магистралью при ее охлаждении до температуры криогенной жидкости. Эти потери определяются зависимостью

$$\Delta m = \frac{mc_p(T_н - T_{к.ж})}{Q}, \qquad (5.7)$$

где m – масса материала заправочных магистралей; c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении; $T_н$, $T_{к.ж}$ – температуры окружающей среды и криогенной жидкости; Q – количество теплоты, поглощаемой при испарении криогенной жидкости.

При заполнении расходных магистралей из бака происходит интенсивная газификация криогенного топлива. Образование газовых пузырьков протекает без каких-либо осложнений до момента, когда $F_{пуз}/F_т$ достигает критического значения 0,55...0,6. Здесь $F_{пуз}$ – площадь поперечного сечения газового пузырька, а $F_т$ – площадь сечения трубы. Выше этого критического значения происходит быстрое увеличение пузыря, он поднимается по магистрали к баку, статическое давление в магистрали падает. До тех пор пока скорость понижения температуры насыщения, соответствующего уменьшению статического давления, превышает скорость понижения температуры жидкости в процессе бурного парообразования, в системе образуются все новые пузыри. Это приводит к выбрасыванию жидкости из магистрали в бак. Такое явление называется гейзерным эффектом.

При последующем заполнении магистрали жидкостью из бака возникает пик давления, аналогичный гидравлическому удару. Этот пик давления может быть очень большим, при этом возможны разрушения магистрали, а также элементов крепления клапанов и магистрали.

Гейзерный эффект можно устранить теплоизоляцией бака и магистрали, переохлаждением компонента, организацией циркуляции топлива или вдувом инертного газа (гелия). В стендовых системах используются первые три способа. Наиболее эффективным способом является циркуляция топлива. Для полного исключения гейзерного эффекта достаточна скорость движения жидкости в системе 0,12...0,3 м/с.

Открытие и закрытие топливных клапанов вызывают изменение количества движения жидкости в магистрали и появление колебаний давле-

ния. Максимальное значение давления зависит непосредственно от модуля упругости материала магистрали E, модуля объемной упругости жидкости K, начальной скорости потока $c_{нач}$, времени закрытия клапана $\tau_{зак}$ и косвенно – от длины магистрали L. Если волна давления распространяется по магистрали от клапана и обратно за время $2L/a$ (a – скорость распространения волны давления в магистрали), равное или большее времени закрытия клапана $\tau_{зак}$, то максимальное значение давления не зависит от этого времени и определяется выражением

$$p_{пик} = \rho a c_{нач}, \tag{5.8}$$

где ρ – плотность жидкости.

Скорость распространения волны давления в магистрали

$$a = \frac{\sqrt{K/\rho}}{\sqrt{1+Kd/(E\delta)}}, \tag{5.9}$$

где d – диаметр магистрали; δ – толщина стенки магистрали.

При медленном закрытии клапана, когда $2L/a$ меньше времени закрытия $\tau_{зак}$, максимальное значение давления уменьшается. Волна давления отражается от открытого конца магистрали (выход в бак) и возвращается к клапану как волна разрежения, прежде чем он полностью закроется. Максимальное давление может быть подсчитано по формуле

$$p_{пик} = p_0 \frac{N}{2}\left(1 + \sqrt{1 + \frac{4}{N}}\right), \tag{5.10}$$

где p_0 – статическое давление в магистрали около клапана перед началом его закрытия;

$$N = \left[\frac{L c_{нач} \rho}{p_0 \tau_{зак}}\right]^2. \tag{5.11}$$

Учитывая динамические параметры магистрали, можно снизить пики давления и уменьшить опасность ее разрушения.

5.5. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИСПЫТАНИЯМИ

5.5.1. Функции системы управления и ее состав

Системой управления испытаниями называют комплекс устройств, посредством которых осуществляют запуск, останов, изменение режимов работы, контроль параметров, аварийный останов ЖРД. В основу системы управления положена релейная автоматика. Часть функциональных блоков выполнена с применением бесконтактных элементов (схемы на транзисторах, схемы с применением операционных усилителей, интегральные микросхемы).

Система управления выполняет следующие функции:

автоматический запуск и останов ЖРД по заданной циклограмме;

автоматический контроль за основными параметрами ЖРД, а при достижении ими критических значений аварийный останов по заданной программе;

автоматическое изменение режимов работы ЖРД;

автоматическое управление стендовыми клапанами, поддержание заданных давлений наддувов и продувок;

автоматический контроль наличия компонентов топлива в стендовых баках, аварийный останов по заданной программе при выработке компонентов;

автоматический контроль целостности электрических цепей ЖРД;

выдачу команд в систему измерения и на запись параметров для контроля работы системы управления;

выдачу временны́х команд (с дублированием от нескольких задатчиков времени);

ручное управление стендом и ЖРД при подготовке их к испытанию и во время испытания.

Систему управления можно разбить на подсистемы, жестко связанные между собой, но решающие свои, вполне определенные задачи (рис.5.5). Связь всех подсистем осуществляется через систему программных устройств. Система программных устройств определяет программу работы, собирает сигналы готовности, выдает команды, которые преобразуются в системе управления стендом, системе управления регулятором расхода, системе управления двигателем и через систему переключений передаются на агрегаты стенда и двигателя для испол-

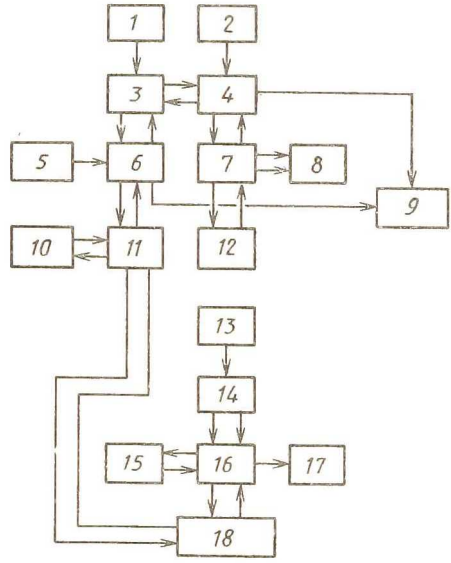


Рис.5.5. Функциональная схема системы управления: 1,2,5,13 – системы питания; 3 – система программных устройств; 4 – система управления стендом; 6 – система управления регулятором расхода; 7, 11, 16 – системы переключений; 8 – эквивалент стенда; 9 – система измерений; 10, 15 – эквиваленты двигателя; 12 – стенд; 14 – система управления двигателем; 17 – система контроля; 18 – двигатель

нения. При необходимости система переключений передает эти команды на эквиваленты стенда и двигателя. Сигналы обратных связей, которыми охвачена вся система управления, с первичных преобразователей через систему переключений подаются в системы 4, 14, 6, где корректируются. Все системы выдают сигналы на запись в систему контроля 17, в задачу которой входит и контроль целостности электрических цепей двигателя. Все необходимое питание в систему управления выдается с помощью комплекса взаимосвязанных блоков, образующих систему питания.

Рассмотрим принципиальные особенности перечисленных систем и их работу при испытании двигателя с пироклапанами.

В системе программных устройств (рис.5.6) использованы четыре задатчика временных команд. Задатчики объединены в пары, которые дублируют друг друга. Задатчики 1 и 2 работают при запуске двигателя, задатчики 3 и 4 – при подготовке к запуску и при выполнении программ останова. Временные импульсы с задатчиков поступают на поле блоков набора временных команд, где формируется необходимое по программе время выдачи команд. Сигналы всех четырех задатчиков временных команд через блок дублирования попадают на поле блоков набора условий, где суммируются с сигналами систем управления стендом и двигателем, и через блоки управления пуском и набора команд вновь сформированные командные сигналы поступают в системы управления стендом и двигателем.

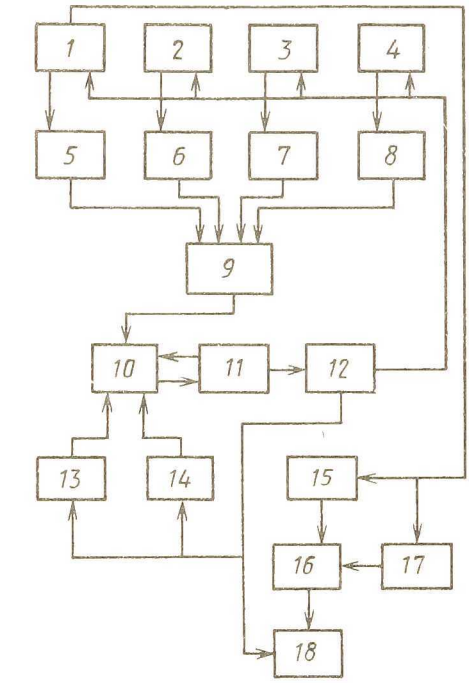


Рис.5.6. Система программных устройств:
1, . . . , 4 — задатчики временных команд; 5, . . . ,8 — блоки набора временных команд; 9 — блок дублирования; 10 — блок набора условий; 11 — блок управления пуском; 12 — блок набора команд; 13 — система управления стендом; 14 — система управления двигателем; 15, 17 — задатчики времени системы управления регулятором расхода; 16 — блок набора временных команд системы управления регулятором расхода; 18 — блок набора команд системы управления регулятором расхода

Аналогично построено программное устройство системы управления регулятором расхода, только система дублирования временных команд совмещена с блоками набора времени и условий.

Запуск системы программных устройств осуществляет оператор кнопкой "Пуск". Система программных устройств позволяет с помощью команд с блока набора команд в соответствии с заданной программой производить останов, сброс и пуск задатчиков временных команд во время работы двигателя.

Система управления стендом обеспечивает автономное (ручное) и автоматическое управление арматурой стенда (пневмоклапанами, электропневмоклапанами и т.п.), поддерживает автоматически заданные давления на входе в двигатель в магистралях окислителя и горючего, давления продувок двигателя, контролирует наличие компонентов топлива в баках и выдает команды в систему программных устройств при их выработке.

Контроль и изменение давлений компонентов топлива на входе в двигатель в соответствии с программой осуществляются с помощью блоков управления наддувами (рис.5.7) посредством подключения необходимого числа электропневмоклапанов 2 гребенки наддува и управ-

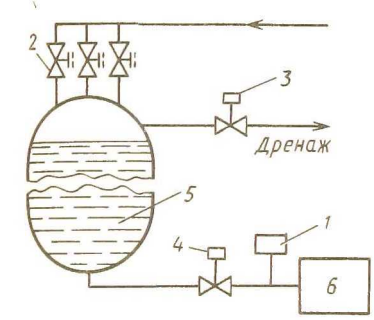


Рис.5.7. Система управления давлением компонентов топлива на входе в ЖРД:
1 — преобразователь давления первичный; 2 — электропневмоклапан; 3 — пневмоклапан; 4 — клапан топливный; 5 — бак топливный; 6 — двигатель

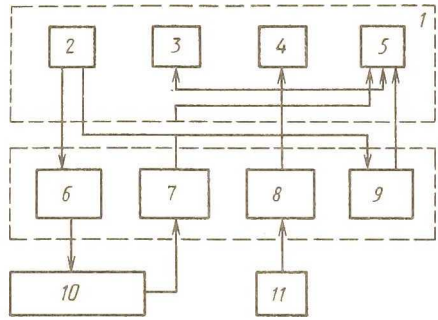


Рис.5.8. Система управления двигателем:
1 — система программных устройств; 2 — блок набора команд; 3 — задатчик временных команд; 4 — блок управления пуском; 5 — блок набора условий; 6 — блок реле пироклапанов; 7 — блок контроля работы ЖРД; 8 — блок выбора режима; 9 — блок определения причины останова; 10 — двигатель; 11 — система переключений

ления положением пневмоклапана 3 дренажа с учетом показаний первичного преобразователя 1 давления топлива, установленного перед топливным клапаном 4.

Для визуального и автоматического контроля наличия компонентов топлива в стендовых емкостях при заправках и в процессе работы двигателя применяют специальную систему контроля уровней. Для этой цели в емкостях монтируют уровнемеры с несколькими контрольными точками, в которых установлены первичные преобразователи. Преобразующая аппаратура выдает информацию на световое табло и в систему программных устройств. При понижении уровня ниже минимально допустимого выдается команда на аварийное выключение двигателя.

Система управления двигателем (рис.5.8) выдает команды на отстрел пироклапанов, контролирует работу двигателя по давлению, температуре, пульсациям и выдает команды аварийного останова при отклонении указанных параметров за допустимые пределы.

Система работает в трех режимах:

1. Автономная работа. Система управления стендом (см. рис.5.5) может быть подключена к стенду или к его эквиваленту. Системы управления двигателем и регулятором расхода подклю-

чаются на эквиваленты, система программных устройств не работает. В этом режиме проводят автономные проверки работы арматуры стенда и подготовку стенда к испытаниям.

2. Комплексная работа. Система управления стендом подключена к стенду или к его эквиваленту, система управления двигателем подключается к эквиваленту, система программных устройств работает. На этом режиме проверяют системы управления в автоматическом режиме с эквивалентами стенда, двигателя или со стендом и эквивалентом двигателя. Режим разрешает замедленный в 100 раз ход задатчика временных команд для удобства проверок набранных программ и его останов при прохождении каждой временной линии программы, что позволяет оператору контролировать правильность выполнения заданных условий и выдачи команд.

3. Огневые испытания. Система управления стендом подключается к стенду, система управления двигателем – к двигателю, система программных устройств работает. Режим обеспечивает проведение огневых испытаний двигателя. При этом режиме блокируются тумблеры включения питаний в системе управления пуском. Системы переключений фиксируются в положении "На стенд" и "На двигатель", исключается замедленный ход и останов задатчика временных команд. При наличии неисправностей систем управлений обеспечивается ручное управление стендовой арматурой и ручная выдача временных команд.

В процессе испытаний в блок контроля работы двигателя поступает непрерывная информация с первичных преобразователей, установленных в контрольных точках двигателя (рис.5.9). В аварийной ситуации блок контроля работы двигателя выдает команды на зыкрытие отсечного пироклапана топлива (контакты 8 реле 7 в блоке контроля работы двигателя) и в систему программных устройств на аварийное отключение двигателя. Происходит останов по программе. В отличие от обыч-

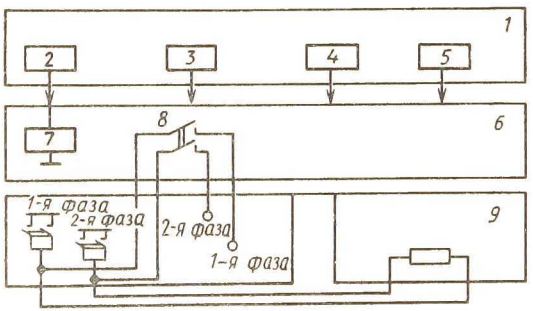


Рис.5.9. Блок контроля работы двигателя: 1 – двигатель; 2, ..., 5 – преобразователи давления, температуры, частоты вращения, пульсаций; 6 – блок контроля работы двигателя; 7 – реле; 8 – контакты реле 7; 9 – пироклапан отсечной

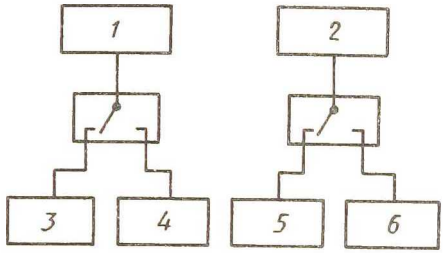


Рис. 5.10. Система переключения на эквиваленты двигателя и стенда: 1 – система управления стендом; 2 – система управления двигателем; 3 – эквивалент стенда; 4 – стенд; 5 – эквивалент двигателя; 6 – двигатель

ной программы останова команда на отсечной пироклапан подается с опережением на 0,05...0,1 с (время запаздывания срабатывания промежуточных реле системы программных устройств). Такая схема предупреждает разрушение двигателя при аварийном отклонении его параметров.

В связи с тем что быстропротекающие аварийные процессы не всегда возможно зафиксировать визуально, в системе управления двигателем выполнена схема запоминания причины останова. Схема принимает сигналы аварийного останова, запоминает их и фиксирует на световом табло.

Исполнение системы управления зависит от типа установленного на двигателе привода, который может быть или с шаговым электродвигателем, или с гидравлической рулевой машинкой. Настройка на заданные по программе параметры выполняется по команде оператора или от системы программных устройств.

Для отладки, ремонта, проверки систем управления без стенда и двигателя используются их эквиваленты, подключаемые к системам управления специальной системой переключения (рис.5.10). Система для большей надежности выполнена на дистанционных переключателях с механическим удержанием. Команда готовности системы переключений (т.е. система управления стендом подключена к стенду, система управления двигателем – к двигателю) вводится в систему программных устройств, что предотвращает возможность проведения работ на эквивалентах в режиме огневых испытаний. При подключении к стенду и к двигателю на всех блоках систем управления мигают соответствующие сигнальные лампочки.

Эквиваленты стенда и двигателя выполняют с максимальным приближением к схеме объекта. Так, эквивалентом пневмоклапана является реле, обмотка которого имитирует обмотку пневмоэлектроклапана двойного действия, контакты – концевой выключатель, сигнальная лампа позволяет оператору контролировать подачу питания на пневмоэлектроклапан двойного действия; сигнализаторы давления ими-

тируются тумблерами, первичные преобразователи давления – потенциометрами. Для удобства отладки все эквиваленты размещаются в пультовой.

В системе измерения и контроля целостности электрических цепей двигателя в качестве измерительного элемента используется автоматический цифровой омметр. К изделию он подключается через коммутатор, который автоматически выполняет заданную программу измерений. Омметр измеряет сопротивление цепей и изоляций. С омметра или со схемы контроля сигналы о целостности цепей выдаются в коммутатор, преобразуются и сравниваются с эталоном. При отличии параметров цепей изделия от нормы преобразованный сигнал достигает уровня срабатывания чувствительного элемента, который останавливает коммутатор и высвечивает на табло адрес неисправной цепи. После устранения неисправности оператор вручную вновь запускает коммутатор и продолжает измерение.

5.5.2. Устройство системы управления

Система управления построена по блочному принципу. Каждый блок представляет собой самостоятельную функциональную единицу. Блоки выполнены в каркасах, на передних панелях которых установлены кнопки, тумблеры, переключатели, контрольные лампочки, а на задних – штепсельные разъемы. Для унификации блоков используют довольно мало элементов автоматики, имеющих небольшие габаритные размеры, большую надежность, достаточное число контактов и значительный ресурс – до 10^8 срабатываний. Все узлы системы управления проходят испытания на надежность. Надежность систем управления должна укладываться в пределы доверительной вероятности 0,9996...0,9998.

Блоки системы управления устанавливают в вертикальные стойки и группируют там по функциональному назначению. Связь между блоками выполняют типовыми гибкими съемными жгутами, связь со стендом осуществляют через клеммные шкафы, коробки. Связь системы управления с двигателем не должна уменьшать ее надежности и мешать ее обслуживанию и ремонту. Со стендового клеммного шкафа через герметизированные закладные элементы жгуты прокладываются в бокс. Конечные штепсельные разъемы этих жгутов крепят в коробке штепсельных разъемов бокса. Жгуты подключения к двигателю (длиной 2...3 м) стыкуют с конечными штепсельными разъемами в коробке бокса и с

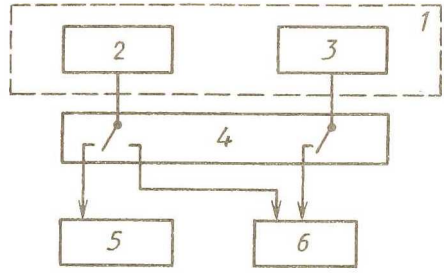


Рис.5.11. Схема подсоединения главного и вспомогательного пультов: 1 – система управления стендом; 2 – пульт главный; 3 – пульт вспомогательный; 4 – блок переключения; 5 – эквивалент стенда; 6 – стенд

двигателем. Коробка выполнена с учетом необходимости защиты стендовой проводки от воды, механических повреждений, пожара при аварийном исходе испытаний. При аварийном исходе могут быть повреждены только жгуты подключения к двигателю.

Для управления стендовой арматурой с одновременным проведением проверок автоматической работы системы управления в пультовой установлены два комплекта блоков управления стендовыми клапанами (рис.5.11) – главный и вспомогательный пульты. При подключении через блоки переключения главного пульта на эквивалент стенда вспомогательный пульт подключается на стенд.

Описанная система управления позволяет проводить большое число испытаний с высокой частотой по различным программам. Полный перебор программы выполняет один оператор за 20...30 мин. Проверка систем автоматики выполняется перед каждым испытанием и занимает около часа. Окончательная проверка проводится со стендовой арматурой, эквивалентом двигателя и его приводом. При этом работает стендовая система наддува, продувок, привода двигателя; имитируются аварийные режимы работы двигателя и стенда. Комплекс работ выполняется с записью системой измерения команд системы управления. Контроль за работой автоматики осуществляется визуально по сигнализации и по материалам записи команд.

5.6. СИСТЕМА НАДДУВА ТОПЛИВНЫХ БАКОВ И СИСТЕМА ПРОДУВОК

Система наддува предназначена для создания и поддержания в процессе испытания необходимого избыточного давления в топливных баках. В нее входят газовые баллоны высокого давления, запорные и регулирующие пневмоагрегаты и трубопроводы.

Система наддува топливных баков должна обеспечивать:

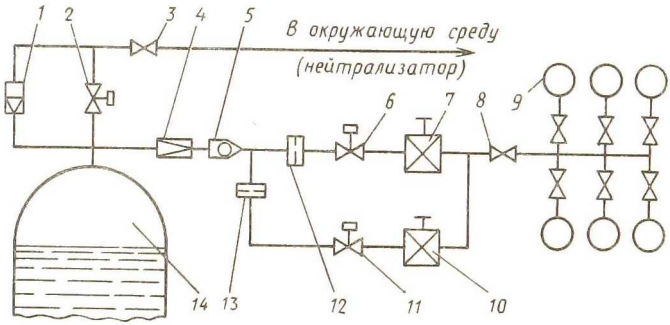


Рис.5.12. Схема системы непрерывного наддува:
1 – клапан предохранительный; 2, 6, 11 – электропневмоклапаны; 3 – вентиль; 4 – фильтр; 5 – клапан обратный; 7, 10 – клапаны регулирующие; 8 – вентиль ручной; 9 – баллон высокого давления; 12, 13 – шайбы; 14 – подушка газовая

пусковое давление и заданный расход топлива при запуске двигателя;

необходимое давление на входе в насос и поддержание его в течение испытания;

возможность регулирования давления по заданной программе;

возможность быстрого автоматического сброса давления из баков при аварийном выключении двигателя.

Управляющее воздействие системы наддува передается на топливо через газовую подушку 14 (рис.5.12), представляющую собой верхнюю часть топливного бака, заполненную газом. Функциональные задачи, выполняемые газовой подушкой, в значительной степени определяются ее объемом. Требования к выбору объема противоречивы. С одной стороны, желателен минимальный объем, чтобы полней использовать бак для заправки топливом. С другой стороны, большой объем газовой подушки обеспечивает меньшую чувствительность системы регулирования наддува к переходным процессам и позволяет получать меньшие колебания давления топлива в баке и трубопроводах. Для удовлетворительной работы пневмоагрегатов системы баков также требуется определенный объем газовой подушки. Это обусловлено тем, что давление газа в системе наддува намного больше, чем давление в баке. Инерция пневмоагрегатов системы наддува из-за инерционных сил и сил трения в механических системах может быть значительной. Поэтому при малом объеме подушки давление в баке и, следовательно, в трубопроводах питания топливом может существенно колебаться. С учетом

изложенного объем газовой подушки обычно принимают равным 1...5 % объема бака.

Рабочее тело системы наддува выбирают исходя из применяемых компонентов топлива. При этом надо учитывать совместимость газа наддува и топлива. Криогенные топлива, такие, как жидкие водород, кислород, фтор, имеют настолько низкие температуры, что лишь немногие газы не конденсируются при контакте с ними. При наддуве бака с жидким водородом лишь гелий и водород остаются в газообразной фазе при температуре 20 К. Азот может конденсироваться в жидком кислороде. Конденсация и растворение газа в топливе создают ряд дополнительных трудностей. Так, при растворении в кислороде 10 % азота тяга двигателя может уменьшиться на 2,5 %.

Газ, растворенный в топливе, может выделяться из топлива при движении его по трубопроводам питания на участках, где давление ниже равновесного. Наличие газовых включений в топливе ускоряет возникновение кавитации в насосах. Другим следствием несовместимости выбранного для наддува газа с топливом является возможность химических реакций и взрыва.

В стендовых системах для наддува в зависимости от применяемых топлив используют воздух, азот или гелий. Давление в газовой подушке $p_{под}$ может быть определено по формуле

$$p_{под} = p_{вх} + \Delta p_{т} - p_{h}, \qquad (5.12)$$

где $p_{вх}$ – давление на входе в двигатель; $\Delta p_{т}$ – потери давления на трение в трубопроводах питания; p_{h} – давление столба жидкости на входе в двигатель, определяемое разностью уровней топлива в баке и на входе в двигатель.

В процессе испытания топливо вытесняется из бака и освобождающийся объем должен заполняться газом из системы наддува. Таким образом, объем газовых баллонов системы наддува должен быть достаточным не только для создания газовой подушки объемом $V_{под}$ с определенным давлением, но и для заполнения объема бака $V'_{б}$, освободившегося в результате выработки топлива, т.е. объем газа в баке в процессе испытания $V_{г} = V_{под} + V'_{б}$. Начальное давление в баллонах обычно значительно выше давления наддува.

Из уравнения состояния можно определить объем $V_{бал}$ баллонов со сжатым газом, необходимый для проведения испытания:

$$V_{бал} = V_г \frac{1}{k} \frac{p_{под}}{p_{бал}} \frac{T_{бал}}{T_{под}}, \qquad (5.13)$$

где k – коэффициент использования газа из баллона; $p_{бал}$ – давление в баллонах системы наддува; $T_{бал}$ – температура газа в баллонах; $T_{под}$ – температура газа в подушке бака.

Минимальное конечное давление в баллонах определяют по формуле

$$p_{балmin} = p_{под} + \Delta p_{ред} + \Delta p_т, \qquad (5.14)$$

где $\Delta p_{ред}$ – перепад давлений на редукторе; $\Delta p_т$ – потери давления в трубопроводе системы наддува.

Очевидно, что полностью использовать газ из баллонов не удается. Коэффициент использования газа определяется по формуле

$$k = 1 - (p_{бал\ min} - p_{под})/p_{бал.нач}, \qquad (5.15)$$

где $p_{бал.нач}$ – начальное давление в баллонах.

В лучшем случае $k = 0{,}8...0{,}9$.

Система наддува может быть непрерывного и пульсирующего действия. На рис.5.12 представлена пневмосхема системы наддува, в которой благодаря непрерывной работе регулирующих клапанов 7 и 10 достигается плавное изменение давления в топливных баках. После открытия ручного вентиля 8 газ из баллонов 9 низкого давления поступает к клапанам 7, 10 и электропневмоклапанам 6 и 11. Электропневмоклапаны открываются по команде с пульта управления, и газ через шайбу 12, обратный клапан 5 и фильтр 4 поступает в бак под давлением, соответствующим настройке клапанов 7 и 10. Обводной трубопровод с клапаном 10 и шайбой 13 имеет значительно меньшие диаметры проходных сечений, чем основная линия, и служит для тонкого регулирования расхода газа. Сброс давления из бака через вентиль 3 происходит при открытии электропневмоклапана 2 по команде с пульта управления или при срабатывании предохранительного клапана 1 в случае повышения давления наддува выше допустимого уровня.

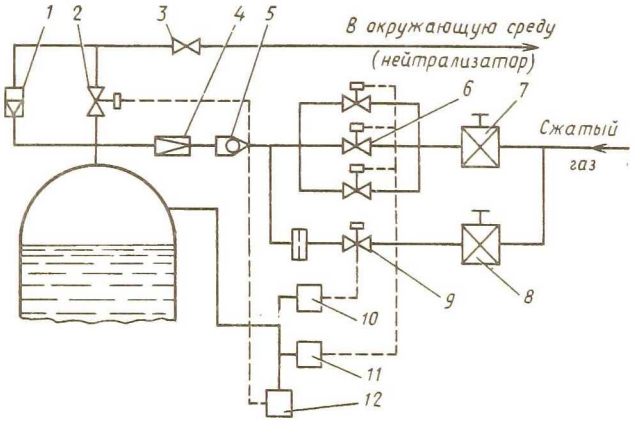


Рис.5.13. Схема системы пульсирующего наддува:
1 – клапан предохранительный; 2, 6, 9 – электропневмоклапаны; 3 – вентиль; 4 – фильтр; 5 – клапан обратный; 7,8 – редукторы; 10,11 – реле; 12 – пневмореле

На рис.5.13 приведена схема системы пульсирующего наддува. От описанной ранее она отличается тем, что редукторы 7 и 8 настраивают на давление, значительно превосходящее заданное давление в газовой подушке топливного бака, а электропневмоклапан 6 на основном трубопроводе и электропневмоклапан 9 на обводном трубопроводе открываются периодически при срабатывании реле 10 и 11. В случае превышения давления наддува заданного уровня срабатывает пневмореле 12 и кратковременным открытием электропневмоклапана 2 стравливается избыточное давление. Эта схема более надежна в работе, поэтому применяется в стендовых системах чаще.

В пневмогидравлической системе стенда газ высокого давления используется не только для наддува баков, но и для продувок различных стендовых магистралей и полостей двигателя. При проведении продувок преследуются следующие цели:

удаление паров компонентов топлива из внутренних полостей стендовых магистралей;

предотвращение попадания атмосферного воздуха во внутренние полости стендовых магистралей и двигателя;

обеспечение постоянства условий запуска камеры сгорания и газогенератора ЖРД;

удаление остатков продуктов сгорания и паров топлива из камеры сгорания при останове двигателя для уменьшения времени догорания топлива.

По давлению используемого газа продувки делятся на "интенсивную" и "вялую". Система продувки включает в себя источник питания, редуктор, запорный и обратный клапаны, фильтр и участок контроля параметров перед местом стыковки с продуваемой магистралью. Установка фильтра обусловливается необходимостью защитить продуваемую полость от попадания различных элементов арматуры при ее разрушении.

5.7. ТЯГОИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯГИ

Тяга является одним из важнейших параметров ЖРД, по которым оценивают его характеристики, поэтому определение зависимости тяги от изменения различных режимных и эксплуатационных факторов является основной задачей испытаний.

К сожалению, прямое измерение тяги не всегда возможно. Это связано с тем, что в стендовых условиях не обеспечивается полное расширение газов в сверхзвуковом сопле ЖРД. Поэтому часто тягу для расчетной высоты определяют косвенным методом по известной формуле

$$P = K_P p_к F_м. \qquad (5.16)$$

В этом случае минимальную площадь сечения сопла $F_м$ определяют предварительно в процессе изготовления (сборки) или по чертежу, давление в камере сгорания $p_к$ измеряют в процессе испытаний, а тяговый комплекс K_P для всех ЖРД данного типа принимают постоянным и равным $K_{P_э}$, найденному по результатам разовых экспериментов на высотных стендах. Если по результатам предварительных продувок известен коэффициент φ_c, то $K_{P_э}$ можно найти из уравнения

$$K_{P_э} = \varphi_c K_{P_т}, \qquad (5.17)$$

где $K_{P_т}$ – теоретический тяговый комплекс, найденный расчетным путем.

Для прямого измерения тяги испытательные стенды оборудуются специальными тягоизмерительными устройствами, состоящими из станка, измерительной и градуировочной системы. Станок состоит из неподвижной станины и рамы, к которой крепят испытываемый ЖРД. Рама

может быть подвижной или неподвижной, она воспринимает тягу и передает ее на измерительную систему и станину.

В зависимости от конструкции станки можно подразделить на четыре группы: 1) станки с минимальным трением; 2) станки с упругими связями между станиной и подвижной рамой; 3) жесткие станки; 4) специальные станки.

К первой группе относятся станки с рамой, перемещающейся относительно станины с минимальным трением. Это различного рода качалки, люнеты, тележки. В настоящее время такие станки для испытания ЖРД практически не применяют.

Ко второй группе относятся станки с подвижной рамой, подвешенной к станине на ленточных подвесках или упругих шарнирах. Подвижная рама станков должна иметь минимальную массу при достаточной жесткости, так как при большой массе (с учетом массы ЖРД) искажается зависимость тяги от времени на переходных режимах. Вектор тяги должен совпадать с направлением перемещения рамы, чтобы исключалось появление боковой составляющей силы и дополнительной погрешности измерения тяги по этой причине.

Для уменьшения измеряемых сил до значений, воспринимаемых механическими или гидравлическими динамометрами, при испытаниях находят применение станки рассматриваемой группы в виде устройств рычажного типа на упругих шарнирах. Рычажные системы состоят из рычагов 1-го и 2-го рода, опорных и соединительных узлов, вспомогательных элементов. Первостепенное значение для точности работы имеет жесткость рычагов, т.е. малая деформация под нагрузкой. В измерительных системах крепление рычагов осуществляется с помощью упругих шарниров и гибких лент.

Конструктивные параметры гибких лент (рис.5.14): ширину a, толщину b и длину l определяют с учетом прилагаемых к ленте нагрузок. При b/a = 1/50 подвижная рама, закрепленная на гибких лентах, не имеет поперечных перемещений. Подвеска на упругих лентах долговечна и надежна в эксплуатации, хорошо работает в условиях вибраций.

Крестообразные упругие шарниры применяют в рычагах в качестве опорных. Преимущество их состоит в незначительном смещении центра

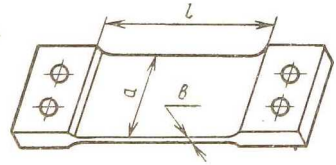


Рис.5.14. Гибкая лента

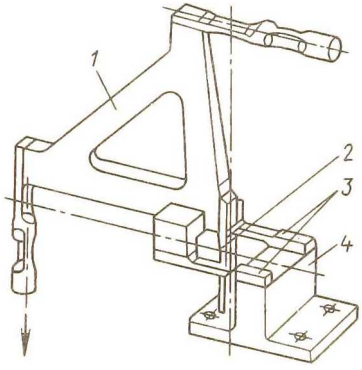


Рис.5.15. Рычаг на упругом шарнире: 1 — рычаг; 2 — пластина вертикальная; 3 — пластина горизонтальная; 4 — опора

вращения при передаче нагрузки. Поворот в упругих шарнирах (рис.5.15) осуществляется вследствие деформаций лент. Для упругих шарниров характерны: малый угол поворота (примерно 2°), надежность в работе, долговечность и простота конструкции. Шарнир состоит из трех пластин: одной вертикальной 2 и двух горизонтальных 3, которые соединяют корпус рычага 1 с корпусом опоры 4. Рабочую нагрузку воспринимают горизонтальные пластины, которые на нее рассчитываются. Вертикальная пластина работает на изгиб. Рабочие напряжения не должны превышать 20 % от предела пропорциональности материала упругой детали.

В рычажных градуировочных системах широко применяют призменные опоры (рис.5.16) для рычагов. Ее основными элементами являются подушка 2 и призма 1, которые изготовляют из высококачественных сталей. Твердость подушки должна быть выше твердости призмы на 3...5 единицы по Роквеллу. Призма запрессована в рычаг 6, а подушка через валик 3 и опору 5 подушки передает силу на опору 4 шарнира.

К призменным опорам предъявляют следующие требования:

параллельность рабочих ребер призм;

минимальные радиусы скругления рабочих ребер;

отсутствие на рабочих ребрах сколов, вмятин, забоин.

К недостаткам призменных опор следует отнести:

повышенный износ при вибрационных нагрузках, который приводит к снижению чувствительности системы и точности измерений;

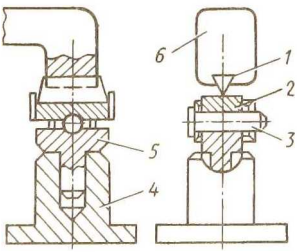


Рис.5.16. Призменная опора: 1 — призма; 2 — подушка; 3 — валик; 4, 5 — опоры; 6 — рычаг

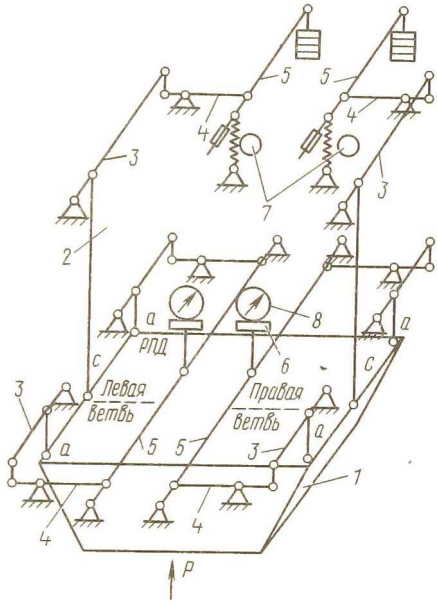


Рис.5.17. Схема рычажного тягоизмерительного устройства:
1 – рама подвижная; 2 – система градуировочная; 3 – рычаг первый; 4 – рычаг второй; 5 – рычаг третий; 6 – переключатель диапазонов рычажный; 7 – электродвигатель; 8 – головка весовая

неспособность воспринимать боковые нагрузки;

сложность передачи знакопеременных нагрузок (необходима предварительная загрузка).

На рис.5.17 приведена схема рычажного тягоизмерительного устройства. Тяга ЖРД P через подвижную раму 1 в четырех точках a передается измерительной системе, которая состоит из двух ветвей: левой и правой. Каждая из ветвей, в свою очередь, состоит из двух цепей, а в каждую цепь входят по три рычага. Первый рычаг 3 каждой цепи воспринимает нагрузку от подвижной рамы. Сила от последних – третьих рычагов 5 каждой цепи – через рычажный переключатель 6 диапазонов передается на весовую головку соответственно в левой и правой ветвях. При подсчете тяги показания весовых головок обеих ветвей суммируются. Описание градуировочной системы будет приведено далее.

К третьей группе станков относятся жесткие станки с неподвижной рамой (рис.5.18). Эти станки конструктивно наиболее просты, отличаются минимальными массой и габаритными размерами. На неподвижной раме 1 установлен испытываемый ЖРД 6. Тяга передается через раму на вибрационно-частотные преобразователи 2, установленные на станине 5, жестко закрепленной на несущей конструкции стенда. Такие станки получили наибольшее распространение в последнее время.

К четвертой группе относятся специальные станки, обеспечивающие возможность измерения тяги ЖРД, имеющих такие конструктивные особенности, которые не позволяют измерить ее на тягоизмерительных устройствах с другими станками. Например, ЖРД с соплами, расположенными под углом к оси камеры сгорания и т.д.

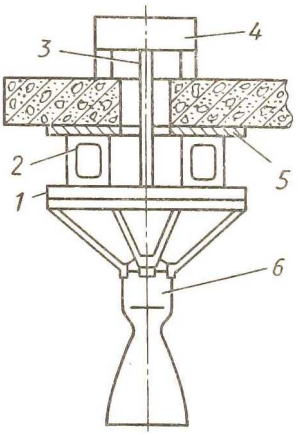


Рис.5.18. Схема жесткого станка тягоизмерительного устройства:
1 – рама неподвижная; 2 – преобразователь вибрационно-частотный; 3 – тяга; 4 – гидроцилиндр; 5 – станина; 6 – ЖРД

Конструкция всех станков зависит от расположения оси ЖРД на стенде, т.е. от того, является ли стенд горизонтальным, наклонным или вертикальным.

Градуировочная система тягоизмерительного устройства по отношению к измерительной системе является образцовой и предназначена для ее поверки и градуировки. С подвижной рамой градуировочная система связана рычагами. Через рычаги к градуировочной системе может быть приложена известная сила, соответствующая по направлению тяге ЖРД. В верхней части рис.5.17 показаны две (левая и правая) ветви градуировочной системы 2.Каждая из ветвей состоит из трех рычагов. Градиуровочная система передает силу на подвижную раму в двух точках *с*. Все рычаги градуировочной системы имеют призменные опоры.

Погрешность градуировочной системы рычажного типа зависит от точности передаточных отношений рычагов, которые определяют весовым способом, так как линейные измерения не дают требуемой точности. Для этого проверяемый рычаг с запрессованными в него призмами вешают в горизонтальном положении. На одно плечо рычага навешивают известный груз Q_1, на другое – уравновешивающий его груз Q_2. По отношению масс грузов подсчитывают передаточное отношение. При использовании гирь третьего класса точность передаточного отношения около 0,01 %.

Градуировку тягоизмерительного устройства проводят после окончания монтажа ЖРД, подсоединения топливных магистралей, измерительных трубопроводов, кабельных стволов систем управления и измерения.

В процессе градуировки к нагружаемому рычагу последовательно подвешивают грузы. В протокол записывают массу грузов и показания регистрирующего прибора. Максимальная масса должна обеспечивать перемещение рамы двигателя, превышающее на 10 % ее перемещение при максимальной тяге. Затем производят разгрузку – снятие грузов в

том же порядке, что и при нагрузке. Разница показаний тягоизмерительного устройства при равных грузах не должна превышать 0,5 % от максимального значения. По результатам градуировки строят график, принимая в расчет средние показания при нагрузке и разгрузке.

Более удобной является нагрузка градуировочной системы гидро- или пневмоцилиндрами, давление в которых измеряется высокочувствительными первичными преобразователями. Управление такой системой может осуществляться дистанционно из пультовой.

При градуировке жесткого станка (см. рис.5.18) имитация тяги ЖРД 6 достигается подачей давления в гидроцилиндр 4, передающий силу на раму 1 посредством тяги 3. Сила воспринимается преобразователями 2, установленными между рамой и станиной 5.

Применение в качестве чувствительного элемента тягоизмерительного устройства вибрационно-частотных первичных преобразователей позволяет использовать для измерения тяги ЖРД жесткие станки без градуировочной системы. В этом случае первичные преобразователи во время периодической профилактики стенда демонтируют со станка и градуируют в измерительной лаборатории. Влияние стендовых систем на тягу учитывают фиксацией показаний первичных преобразователей при различных состояниях этих систем (последовательно после стыковки с ЖРД и обвязки его, после подачи компонентов топлива к ЖРД и после наддувов непосредственно перед запуском ЖРД. Значение тяги определяют по градуировочным характеристикам первичных преобразователей как разность их показаний при работе ЖРД и непосредственно перед запуском.

5.8. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ВЫСОТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В НАЗЕМНЫХ УСЛОВИЯХ

При наземных испытаниях ЖРД, предназначенных для использования в верхних слоях атмосферы или в космосе, для определения их параметров, в первую очередь тяги, времени задержки воспламенения, параметров теплового режима в камере сгорания, устойчивости процесса горения, надежности, а также ресурса работы агрегатов, необходимо понизить противодавление в выходном сечении сопла настолько, чтобы получить безотрывное течение газа в его сверхзвуковой части.

Понижение противодавления на выходе из сопла можно обеспечить применением барокамер, вакуумных насосов, эжекторов и выхлопных

диффузоров, причем они могут быть применены как в отдельности, так и в различных комбинациях. В настоящее время существуют три способа создания условий, имитирующих высотные:

1. ЖРД помещают в емкость довольно большого объема (барокамеру), в которой создают разрежение путем откачки воздуха вакуумными насосами. В ходе испытаний продукты сгорания выбрасываются в эту емкость. Чтобы как-то компенсировать повышение давления в барокамере, вызванное истечением газов с высокой температурой, в ней устанавливают конденсационные устройства, в которых газы конденсируются на поверхности, охлажденной жидким азотом или гелием. Однако высотные камеры для испытания натурных ЖРД верхних ступеней ракет достаточно громоздки и дороги, поэтому этот способ применяют лишь для испытаний ЖРДМТ.

2. Для создания высотных условий на стенде используют понижение давления с помощью эжекторного эффекта, вызванного потоком вторичного газа. При этом массовый секундный расход газа вторичного потока может значительно превосходить массовый секундный расход основного газового потока – потока продуктов сгорания, что приводит к существенному возрастанию габаритных размеров стендового оборудования и стоимости испытаний. Подобный способ чаще используют при испытаниях ЖРДМТ. Он описан в гл.8.

3. Высотные условия при стендовых огневых испытаниях ЖРД создаются с помощью сравнительно небольшой вакуумированной емкости с присоединенным к ней диффузором. В этом случае понижение давления достигается с помощью эжекторного эффекта истекающих продуктов сгорания. Конструкция выходных диффузоров относительно проста, и они недороги в изготовлении. Недостатком этих диффузоров является необходимость их замены при изменении ЖРД или его габаритных размеров. В настоящее время такой способ вакуумирования является на стендах основным.

Простейшим выходным диффузором (рис.5.19) для ЖРД является прямая цилиндрическая труба 1, присоединенная либо непосредственно к соплу в его выходном сечении, либо к камере 3, в которой находится ЖРД 2. ЖРД закреплен на станке 5 через тягоизмерительное устройство 4.

Кинетическая энергия газов, выходящих из сопла ЖРД, используется для понижения противодавления за соплом, которое позволяет получить в нем безотрывное течение. Однако понижение противодавления, достаточное для обеспечения безотрывного течения, может быть получено только при определенных режимах работы ЖРД.

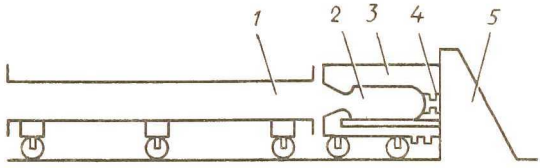


Рис.5.19. Диффузор, присоединяемый к вакуумной камере, в которой установлен ЖРД:
1 – труба цилиндрическая; 2 – ЖРД; 3 – камера вакуумная; 4 – устройство тягоизмерительное; 5 – станок

Восстановление давления в диффузоре осуществляется посредством системы последовательных ударных волн и постепенного, но не обязательно плавного замедления скорости потока газа до дозвуковой.

Условия, при которых скачок уплотнения не заходит внутрь сопла ЖРД, испытываемого на стенде, должны соответствовать расчетным, обеспечиваемым диффузором. При этом необходимо выяснить, каким для данного ЖРД с конкретным диаметром критического сечения $d_{кр}$ нужно выбирать диаметр диффузора и каким должно быть отношение длины этого диффузора l к его диаметру $d_д$. Требуемое отношение $d_д/d_{кр}$ может быть определено с помощью зависимости типа представленной на рис.5.20, полученной экспериментально. По назначенному давлению,

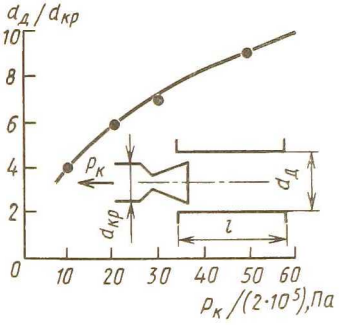


Рис. 5.20. Зависимость геометрических характеристик диффузоров (типа цилиндрической трубы) от параметров испытываемого ЖРД

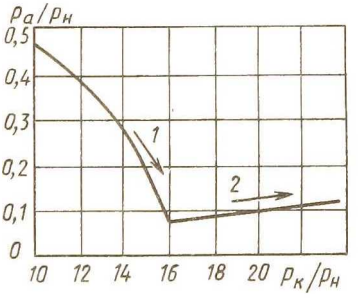


Рис. 5.21. Типичные характеристики выходного диффузора типа цилиндрической трубы:
1 – для области, в которой поток отрывается от стенок сопла; 2 – для области безотрывного течения; p_a – давление на срезе сопла

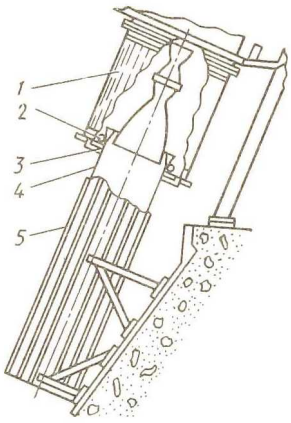


Рис.5.22. Схема установки выходного диффузора с водяным охлаждением:
1 — камера вакуумная; 2 — коллектор; 3 — крышка; 4 — диффузор; 5 — рубашка

обычно выбираемому меньше давления в камере сгорания $p_к$, и известному $d_{кр}$ определяют $d_д$. Длину диффузора на основании опыта выбирают из условия $l/d_д \geqslant 1$.

Типичные характеристики диффузора типа цилиндрической трубы, полученные для потока газа, состоящего из продуктов сгорания гидразина и четырехокиси азота, представлены на рис.5.21.

Полное давление на входе в диффузор, необходимое для его запуска, можно вычислить исходя из того, что при запуске прямой скачок уплотнения должен находиться в выходном сечении сопла ЖРД. Полное давление перед скачком вычисляется в предположении, что статическое давление после этого скачка равно атмосферному. Минимальное пусковое полное давление у рассматриваемых диффузоров приблизительно такое же, как и минимальное полное рабочее давление.

На рис.5.22 показан диффузор типа цилиндрической трубы для испытаний ЖРД, полностью помещенного в вакуумную камеру 1. Для защиты от перегрева диффузор охлаждают водой. Вода подводится к коллектору 2 и затем поступает в рубашку 5. Снизу вакуумная камера герметизируется массивной крышкой 3. Между соплом и внутренними стенками диффузора имеется зазор, что исключает его влияние на измерение тяги ЖРД. В начале огневого испытания воздух из вакуумной камеры быстро отсасывается через этот зазор путем эжекции струей продуктов сгорания. Это обеспечивает в вакуумной камере во время испытания низкое давление (примерно 0,007 МПа).

Эффективнее выходной диффузор с переменной площадью поперечного сечения (рис.5.23). Он состоит из конического сужающего входного участка 1, цилиндрической горловины 2 и расширяющего выходного участка 3. Диффузор входит в вакуумную камеру 4, в которой расположен ЖРД 6. Между соплом ЖРД и входом диффузора имеется зазор 5.

Характеристика одной из разновидностей диффузора с горловиной представлена на рис.5.24. Необходимо отметить, что характеристики

диффузоров различных конфигураций или одних и тех же диффузоров, но при разных рабочих телах существенно различаются, хотя эти характеристики подобны.

Диффузоры с горловиной могут иметь более низкое, чем у диффузора типа цилиндрической трубы, полное рабочее давление, значение которого можно приблизительно определить, предположив, что прямой скачок уплотнения расположен в критическом сечении диффузора, т.е. в его горловине. При этом полное давление перед скачком вычисляют по статическому давлению за ним, принимаемому равным атмосферному. Максимальная степень сужения диффузора $d_д^2/d_г^2$ может быть определена таким же способом. Анализ конструкции диффузоров с горловиной показал, что их характеристики в значительной степени зависят от конфигурации входной части и улучшаются, если отношение $l_г/d_г > 8$ (см. рис.5.23).

Диффузор, характеристика которого показана на рис.5.24, можно запустить, если увеличивать отношение $p_к/p_н$ от некоторого небольшого значения, при котором в сопле происходит отрыв потока от стенок, до такого значения, при котором в нем внезапно устанавливается безотрывное течение. Это значение является минимальным при запуске диффузоров. Если это отношение давлений уменьшать, то безотрывное течение в сопле внезапно прекращается и точка отрыва потока входит в сопло.

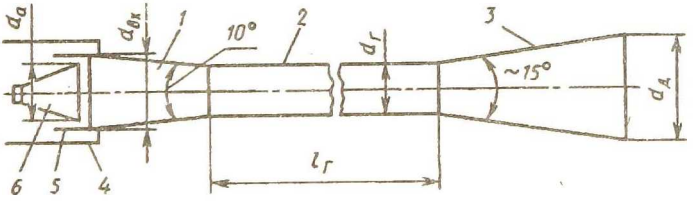


Рис.5.23. Выходной диффузор с переменной площадью проходного сечения:

1, 3 – участки входной и выходной; 2 – горловина цилиндрическая; 4 – камера вакуумная; 5 – зазор; 6 – ЖРД; d_a – диаметр сопла; $d_{вх}$ – диаметр входа в диффузор; $d_г$ – диаметр горла диффузора; $d_д$ – диаметр выхода из диффузора; $l_г$ – длина горла диффузора

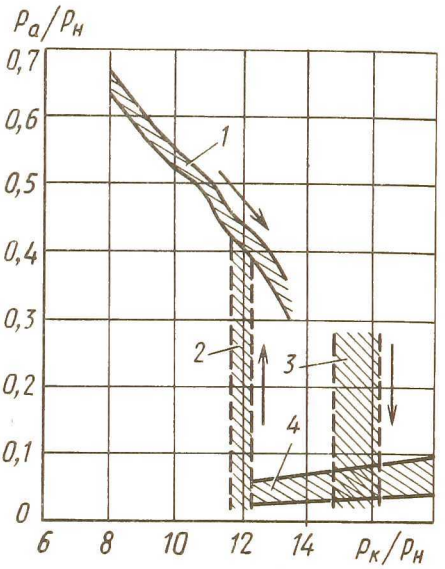


Рис.5.24. Типичные характеристики выходного диффузора с горловиной:
1 — при течении газа с отрывом от стенок сопла; 2 — при минимальном отношении давлений на рабочем режиме; 3 — при минимальном отношении давлений при запуске ЖРД; 4 — при безотрывном течении газа в сопле

Увеличение отношения $p_к/p_н$ с целью обеспечения запуска ЖРД с безотрывным течением в сопле возможно путем организации в начальный момент эжектирования вторичного газа, подаваемого в выходное сечение диффузора, отсоса первичного газа вблизи входа в горловину диффузора или путем установки вакуумной камеры на выходе из диффузора (рис.5.25).

Перед началом испытания отверстие задней стенки вакуумной камеры 3 закрывается легкосбрасываемой заслонкой 4, после чего из системы отсасывается воздух до заданного разрежения. После запуска ЖРД 1 вакуумная камера заполняется выходными газами, давление в ней увеличивается и заслонка отбрасывается. В дальнейшем вакуумная камера на характеристики диффузора 2 не влияет.

Применение вакуумной камеры кроме облегчения запуска диффузора позволяет исследовать особенности запуска двигателя в условиях разреженной среды.

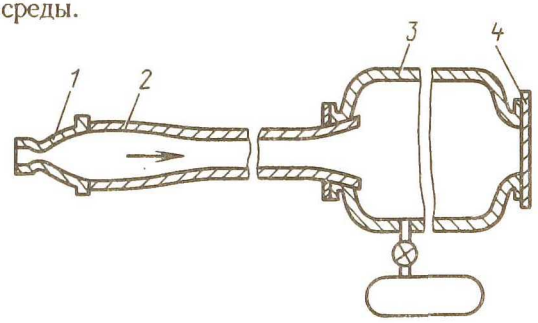


Рис.5.25. Схема установки камеры на выходе диффузора:
1 — двигатель; 2 — диффузор; 3 — камера вакуумная; 4 — заслонка

Диффузоры, применяемые в настоящее время на стендах для обеспечения высотных условий, по способу охлаждения можно подразделить на диффузоры с двойными стенками, между которыми по спиралевидным каналам охлаждающего тракта течет вода, и диффузоры с пленочным охлаждением, обеспечиваемым инжектируемой водой, собранной в коллекторе, расположенном на входе в диффузор.

5.9. АВТОНОМНЫЕ ИСПЫТАНИЯ АГРЕГАТОВ

5.9.1. Особенности испытаний

Автономные испытания агрегатов ЖРД предшествуют огневым испытаниям ЖРД в целом на испытательном стенде. Автономным испытаниям подвергают камеры сгорания, газогенераторы, насосы и турбины ТНА, элементы топливной системы, системы регулирования и др. Для проведения таких испытаний на испытательном комплексе имеются специальные установки, собранные в зависимости от функционального назначения в специально приспособленных помещениях.

В процессе отработки конструкции и серийного производства агрегаты подвергают целому ряду автономных испытаний для проверки:

прочности конструкции и определения гидравлических характеристик;

герметичности;

работоспособности во всем температурном диапазоне эксплуатационных условий;

работоспособности после тряски, имитирующей транспортировку;

вибропрочности.

Требования к условиям и средствам испытания:

1. Гидро- и пневмоиспытания должны проводить в специальных помещениях в заданном диапазоне температур. Колебания температуры воздуха в процессе испытания не должны превышать 5 °С.

2. Для гидроиспытаний необходимо применять водные растворы или рабочие жидкости в соответствии с технической документацией.

3. Материал трубопроводов, технологических емкостей и арматуры не должен изменять состава воды или раствора, применяемых для гидроиспытаний.

4. После гидроиспытаний до проверки герметичности объекты должны быть высушены.

5. Испытания агрегатов на герметичность необходимо выполнять до нанесения на них лакокрасочных покрытий.

6. При испытаниях необходимо применять меры, исключающие попадание пыли, грязи и влаги в рабочие полости, а также повреждение объекта и его уплотняющих поверхностей.

Гидроиспытания включают гидровку и проливку агрегатов.

Гидровка является обязательным этапом процесса изготовления и проводится для проверки прочности. При гидровке заглушают все фланцы и штуцера и во внутренние полости подают жидкость под давлением, на 25 % превышающем максимальное рабочее давление. Агрегат при этом находится в специальном боксе.

Проливку агрегатов осуществляют для определения пропускной способности или гидросопротивления трактов. Под пропускной способностью понимают объемный или массовый расход при заданном перепаде давлений. При определении гидросопротивлений находят перепад давлений при заданном расходе. В серийном производстве для относительной оценки уровня гидросопротивлений проливка может быть заменена продувкой воздухом, что значительно упрощает процесс.

Пневмоиспытания проводят для проверки собранных агрегатов на герметичность (опрессовка) и относительной оценки гидросопротивлений трактов (продувка). Давление воздуха в испытываемом объекте во время пневмоиспытаний обычно составляет 0,6...0,8 рабочего давления.

Существует несколько методов оценки герметичности:

1. Метод спада давления. В испытываемом объекте создают избыточное давление и измеряют давление в начале и в конце установленного промежутка времени. Изменение давления свидетельствует о негерметичности объекта. Этот метод рекомендуется применять при испытании объектов, объем которых не превышает 0,5 л, так как с увеличением объема растет продолжительность испытания. За время испытания температура окружающей среды не должна изменяться более чем на $\pm 2^{\circ}$ С.

Этим методом места течи не определяют.

2. Метод обмыливания. При этом методе соединения испытываемого объекта покрывают мыльной эмульсией. Перед нанесением ее объект выдерживают под испытательным давлением в течение 3...5 мин. С момента нанесения эмульсии каждый участок контролируемой поверхности выдерживают в течение 2...3 мин, после чего по-

верхность осматривают для обнаружения негерметичности. В местах негерметичности эмульсия вздувается.

3. Метод аквариума. При испытаниях по этому методу испытываемый объект с поданным в него воздухом погружают в жидкость. Если после выдержки объекта в жидкости в течение 3...5 мин нет выделения пузырьков, то объект считают герметичным. Метод целесообразно применять при испытании объектов объемом не более 150 л, внешние поверхности которых не имеют глубоких, плохо просматриваемых впадин.

4. Метод галогенных течеискателей. Галогенные течеискатели применяют для определения места небольшой течи. Принцип действия галогенного течеискателя сводится к следующему: чувствительный элемент течеискателя содержит диод с платиновыми электродами, анод которого подогревают до температуры 900 °С. Присутствие в воздухе газов, содержащих галогены, приводит к резкому повышению эмиссии ионов. Испытываемый объект наполняют под избыточным давлением галогеносодержащим газом (фреоном или его смесью с воздухом и азотом). С помощью вентилятора через межэлектродное пространство чувствительного элемента непрерывно "протягивается" воздух, а вместе с ним и галогеносодержащие газы, вытекающие через течи испытываемого объекта. Увеличенная сила ионного тока регистрируется стрелочным прибором. Течи ищут щупом, входящим в комплект течеискателя, путем перемещения его по поверхностям испытываемого объекта. Чувствительность течеискателей к галогеносодержащим газам определяют перемещением щупа над эталоном контрольной течи. Галогеносодержащие газы из испытываемого объекта удаляют по дренажным линиям обязательно за пределами помещения.

5. Метод остаточных устойчивых деформаций. На поверхность объекта наносят специальную контрольную массу и фиксируют утечки по образованию пузырей или кратеров, которые позволяют обнаружить места негерметичности даже после сброса давления в объекте.

6. Метод устойчивых следов. На объект наносят чувствительное к аммиаку индикаторное вещество, а в объект подают под давлением контрольный газ (воздушно-аммиачную смесь). В местах течей индикаторное вещество под воздействием аммиака изменяет свой цвет, образуя пятна малинового цвета, хорошо выделяющиеся на основном фоне покрытия. При испытании объектов этим методом возможно обнаружение мест течей после сброса давления из объекта, что важно для безопасности испытаний.

5.9.2. Установки для испытаний камер сгорания и газогенераторов

Автономные испытания камер сгорания и газогенераторов проводят для определения гидравлических характеристик трактов камер, газогенераторов и их элементов (холодные испытания), а также для оценки теплового состояния объектов, устойчивости и эффективности протекающих в них рабочих процессов (горячие испытания). Этим испытаниям обычно предшествуют технологические проверки камер сгорания, газогенераторов, их узлов на прочность (гидроиспытания) и герметичность (пневмоиспытания), а у некоторых элементов (форсуночных головок) перед испытаниями оценивают характеристики. Обычно технологические проверки проводят в производственных цехах предприятия, изготовляющих ЖРД.

В процессе изготовления автономным гидроиспытаниям подвергают все форсунки по отдельности и форсуночную головку в сборе. При этом определяют, кроме гидросопротивления и пропускной способности, угол конуса распыления и равномерность распределения жидкости по конусу распыления.

Угол конуса распыления может быть определен оптическим теневым методом или фотографированием. Для определения неравномерности распределения жидкости по конусу распыления используют устройства, улавливающие выходящую из форсунки жидкость. Устройство имеет несколько равномерно расположенных секций. Ось форсунки должна совпадать с осью устройства, секции которого не должны сообщаться между собой. Глубину секции выбирают из условия минимального распыления воды. Расстояние между срезом форсунки и устройством должно быть таким, чтобы вся распыленная жидкость попадала в секции. По результатам испытаний вычисляют коэффициент неравномерности (в процентах):

$$k = \frac{q_{max} - q_{min}}{q_{ср}} 100,$$

где q_{max}, q_{min}, $q_{ср}$ – соответственно максимальный, минимальный и средний расход через секцию.

Коэффициент неравномерности может быть определен также объемным методом и по времени наполнения равных фиксированных объемов.

Огневые автономные испытания камер сгорания и газогенераторов проводят при разработке нового ЖРД.

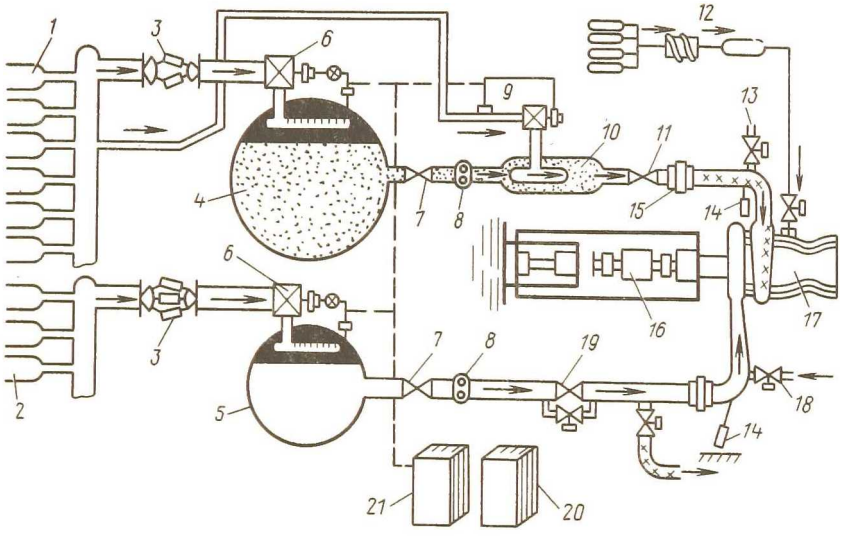


Рис.5.26. Пневмогидравлическая схема стенда для огневых испытаний камеры сгорания ЖРД:

1, 2 – баки с водородом и азотом; 3 – фильтр; 4, 5 – системы жидкого водорода и кислорода; 6 – клапан; 7 – клапан предохранительный; 8 – расходомер; 9 – преобразователь первичный; 10 – смеситель; 11, 19 – клапаны топливные; 12 – система воспламенения; 13, 18 – клапаны подачи гелия и азота; 14 – демпфер; 15 – соединение механическое; 16 – устройство тягоизмерительное; 17 – камера сгорания; 20 – ЭВМ; 21 – устройство программное

Они позволяют определить характеристики агрегатов, выявить дефекты конструкции на ранней стадии проектирования и отработки и тем самым сократить сроки доводки ЖРД и материальные затраты на нее.

При этом стенды для испытаний камер сгорания и газогенераторов принципиально мало отличаются от стендов для испытаний полноразмерных ЖРД и включают в себя те же системы: топливо-питания, измерения, управления, отвода продуктов сгорания и т.д. Отличие состоит в том, что при огневых испытаниях используют технологическое оборудование (топливные магистрали, клапаны, регуляторы, ТНА и т.д.) с хорошо известными статическими и динамическими характеристиками.

Пневмогидравлическая система стенда для автономных огневых испытаний камеры сгорания ЖРД (рис.5.26) представляет собой две параллельные системы (жидкого водорода 4 и жидкого кислорода 5).

Компоненты топлива находятся в баках и вытесняются газообразным водородом и азотом, подаваемыми через фильтры 3. Система жидкого водорода снабжена вакуумной рубашкой. На топливных магистралях находятся предохранительные клапаны 7, расходомеры 8, топливные клапаны 11, 19 и гибкие соединения при входе в камеру сгорания 17. В систему наддува входят клапаны 6 с гидравлическим сервоприводом.

В систему горючего входит также смеситель 10, в котором газообразный водород смешивается с жидким. Подогретый поток используется для испытания неохлаждаемых камер сгорания. Такая система имитирует нагрев водорода в тракте регенеративного охлаждения натурного ЖРД, а также позволяет регулировать температуру топлива на входе в камеру сгорания для определения пределов устойчивого горения.

В системе воспламенения 12 применяется газообразный фтор, обеспечивающий самовоспламенение с газообразным водородом, подаваемым в камеру сгорания с некоторым опережением. Система позволяет обеспечить продувку гелием и азотом. Колебания трубопровода в районе механического соединения 15 гасятся демпфером 14.

Камера сгорания установлена на силовой раме. В тягоизмерительное устройство 16 вмонтирован динамический тензопреобразователь совместно с градуировочной системой.

Управление пуском от программного устройства 21 реализуется с помощью электронного пульта управления, совмещенного с ручным. Результаты испытаний анализируются на ЭВМ 20.

В рассмотренной схеме применена вытеснительная система топливоподачи.

На стендах с насосной топливной системой используют технологический ТНА, работающий от стендового газогенератора или электропривода. Топливные насосы обычно расположены на одном валу и, следовательно, имеют одинаковую частоту вращений. В этом случае необходима настройка топливной системы на заданные расходы компонентов топлива. Настройка заключается в определении необходимых частот вращения насосов и гидросопротивлений магистралей окислителя и горючего. Для настройки необходимо знать:

характеристики насосов и турбины;

гидросопротивление расходных магистралей стенда $\Delta p_{маг}$;

давление газов в камере сгорания $p_к$;

гидросопротивление полостей окислителя и горючего камеры сгорания $\Delta p_к$.

Расчет настройки производят в следующем порядке:

1. Определяют потребное давление $p_{потр}$ окислителя и горючего за насосами по формуле

$$p_{потр} = p_к + \Delta p_к + \Delta p_{маг} - p_H, \qquad (5.18)$$

где p_H – давление столба жидкости высотой от уровня топлива до уровня входа в двигатель.

2. По характеристикам насосов определяют потребные частоты вращения насосов окислителя и горючего. За рабочую частоту вращения принимают ее наибольшее значение (например, частоту вращения насоса окислителя).

3. На рабочей частоте вращения по характеристике насоса горючего определяют располагаемое давление за насосом горючего $p_{н.г.расп}$.

4. Вычисляют перепад давлений на дроссельной шайбе, устанавливаемой в магистрали горючего, $\Delta p_г = p_{н.г.расп} - p_{н.г.потр}$.

5. По этой величине по характеристике дросселя определяют положение дросселя горючего или диаметр дроссельной шайбы.

6. С учетом характеристик турбины и газогенератора определяют расход рабочего тела.

Горячие автономные испытания позволяют разработать эффективные меры по увеличению устойчивости рабочего процесса в энергоузлах ЖРД.

5.9.3. Установки для испытаний насосов и турбин ТНА

Автономные испытания насосов проводят для определения характеристик, поля скоростей на выходе из насоса. Обычно определяют зависимости напора, мощности и КПД от подачи жидкости при номинальной частоте вращения и постоянном давлении на входе в насос. При снятии кавитационной характеристики определяют зависимость развиваемого напора, мощности и КПД от давления на входе при номинальных расходе и частоте вращения.

Характеристики обычно определяют на установках (рис.5.27) с использованием в качестве рабочего тела очищенной от механических примесей фильтром 12 смягченной воды. Расходная емкость 9 запол-

няется водой с помощью бустерного насоса 1. Необходимый уровень подпора устанавливается вентилями 6, 10, 11 и 13. При открытом вентиле 8 вода через фильтр 7 поступает к испытываемому насосу 5. Заданную частоту вращения насоса устанавливают электродвигателем 3, месдоза 4 служит для измерения крутящего момента. Вентилем 8 устанавливается необходимая подача, значение которой контролируется по дифманометрам 2.

Для построения характеристик подачу изменяют через интервалы в 5...10 % от номинальной, поддерживая постоянными частоту вращения и давление на входе. Для снятия кавитационных характеристик при номинальном значении подачи ступенчато снижают давление на входе в насос $p_{вх}$. Срыв в работе насоса определяют по интенсивному уменьшению давления $p_{вых}$ на его выходе.

Автономные испытания турбин проводят на модельных режимах, определенных с учетом теории подобия. В качестве рабочего тела чаще всего используют воздух или фреон. Применение фреона позволяет подобрать, соблюдая критерии подобия, модельные режимы испытания для снижения мощности, частоты вращения, подачи газа и его давления.

Установки для испытания турбин могут быть выполнены по разомкнутой (с выбором рабочего тела после турбины в окружающую среду) и по замкнутой схемам.

Установка для испытания турбин выполнена по замкнутой схеме и включает в себя охлаждаемый водой теплообменник 2, (рис.5.28), компрессор 1, приводимый во вращение электродвигателем 16. Регулирование расхода осуществляется перепуском части рабочего тела обратно на вход в компрессор вентилем 5.

Испытание турбины можно проводить на сжатом воздухе, поступающем от рампы 11 через редуктор 10 и вентиль 9. Сброс воздуха в ок-

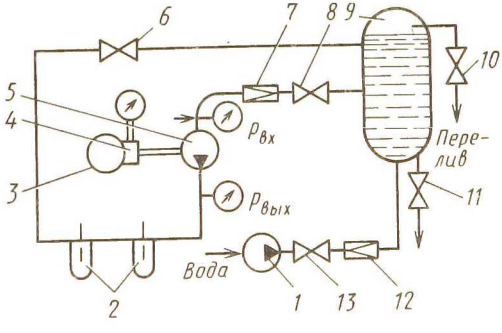


Рис.5.27. Схема установки для испытания насосов: 1 – насос бустерный; 2 – дифманометр; 3 – электродвигатель; 4 – месдоза; 5 – насос; 6, 8, 10, 11, 13 – вентили; 7, 12 – фильтры; 9 – емкость расходная

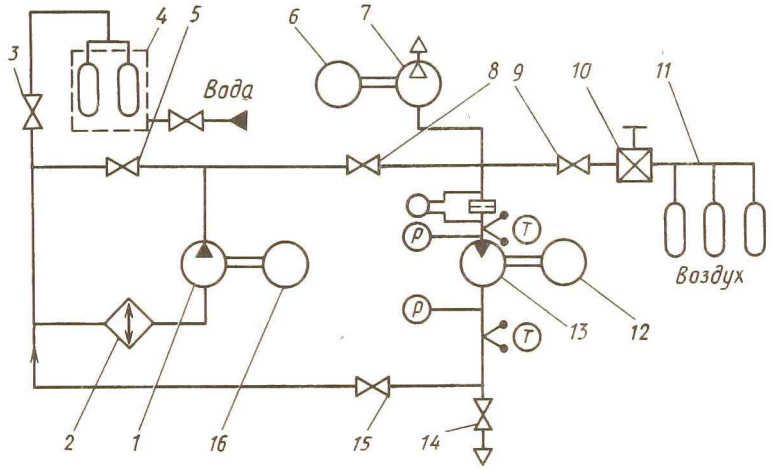


Рис.5.28. Схема установки для испытания турбин на различных модельных газах:

1 – компрессор; 2 – теплообменник; 3, 5, 8, 9, 14, 15 – вентили; 4 – батарея баллонов; 6, 16 – электродвигатели; 7 – вакуум-насос; 10 – редуктор; 11 – рампа; 12 – тормоз; 13 – турбина испытываемая

ружающую среду производится через вентиль 14. При работе на воздухе фреоновый контур отключен вентилями 8 и 15.

Перед заполнением установки фреоном из нее вакуум-насосом 7, работающим от электродвигателя 6, удаляется воздух. Система заполняется фреоном из батареи баллонов 4 через вентиль 3. Для повышения давления фреона баллоны подогревают горячей водой.

Для определения характеристики турбины в процессе испытания необходимо обеспечить измерение с помощью тормоза 12 крутящего момента, развиваемого турбиной, частоты вращения, давления p и температуры T рабочего тела до и после турбины, расхода газа через турбину. Расход находят по перепаду давлений на мерной шайбе, установленной перед турбиной.

По результатам измерения строят рабочую характеристику турбины, определяемую зависимостью приведенного расхода и КПД от критерия кинематического подобия при постоянной степени расширения рабочего тела в турбине, постоянных давлении и температуре, а также зависимостью приведенного расхода от степени расширения рабочего тела в турбине при постоянном значении критерия кинетического подобия и постоянном давлении на входе в турбину.

Иногда, особенно для ЖРД больших тяг, проводят автономные испытания ТНА совместно с газогенератором, так как ТНА требует очень больших затрат мощности. Автономная совместная отработка ТНА и газогенератора при огневых испытаниях позволяет существенно уменьшить материальные затраты на создание ЖРД, так как возможный аварийный исход испытания этого узла не ведет к разрушению ЖРД.

5.9.4. Установки для испытаний агрегатов автоматики

У агрегатов автоматики (регуляторов, дроссельных кранов, клапанов) кроме прочности, гидросопротивлений определяют:

значения давлений в управляющей и топливных полостях в начале и при окончании движения запорного органа;

возможное время пребывания в среде компонентов топлива; герметичность уплотнений на воздухе и в компонентах.

При проливке агрегатов водой на специальных стендах определяют гидравлические потери и гидросопротивления отдельных элементов и агрегата в целом, исследуют направление и распределение потока жидкости и его влияние на перекосы, заедания деталей и т.д. Для определения деформаций или напряжений при гидроиспытаниях наиболее ответственные элементы деталей подвергают тензометрированию. Сравнение показаний тензопреобразователей при динамических нагрузках в процессе работы в составе ЖРД и при статических испытаниях дает возможность судить о фактических запасах прочности агрегата.

Ресурс агрегата проверяют при испытаниях на специальном стенде, позволяющем имитировать условия эксплуатации. Одновременно по мере наработки ресурса проверяют герметичность уплотнений и влияние на уплотнение температуры.

Проведение перечисленных испытаний требует специального оборудования, позволяющего:

обеспечить постоянный заданный расход рабочего тела или поддерживать постоянным заданное давление, причем необходимо иметь возможность изменять это давление в широких пределах;

автоматически поддерживать заданную температуру окружающей среды;

производить резкие или плавные изменения режима работы агрегата;

выдерживать длительное время агрегат под давлением компонента.

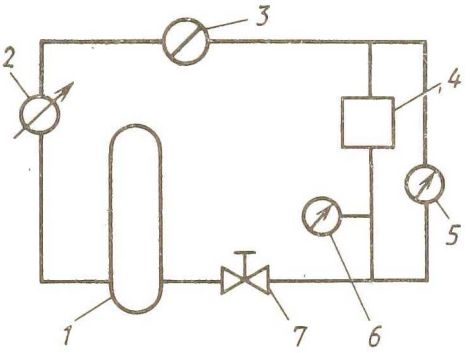


Рис.5.29. Схема проливочного стенда:
1 – бак; 2 – насос; 3 – расходомер; 4 – агрегат; 5 – дифманометр; 6 – манометр; 7 – вентиль

Принципиальные схемы стендов для автономных испытаний агрегатов ничем не отличаются от обычных проливочных гидравлических установок. Они могут быть выполнены с вытеснительной или насосной подачей рабочего тела. В последнем случае стенд позволяет проводить испытания по замкнутому циклу, что значительно увеличивает время активного эксперимента.

Проливочный стенд (рис.5.29) позволяет определить гидросопротивление тракта испытываемого агрегата 4 при заданном расходе жидкости, подаваемой насосом 2 из бака 1. Расход контролируется расходомером 3. Противодавление регулируется вентилем 7 и определяется по манометру 6. Перепад давления на агрегате измеряется дифманометром 5.

Контрольные вопросы

1. Состав испытательных комплексов. Основные требования к ним.
2. Классификация испытательных стендов.
3. Основные требования к топливной системе стенда.
4. Особенности заправки топливной системы стенда криогенными компонентами.
5. Функциональный состав стендовой системы управления испытаниями.
6. Способы обеспечения наддува топливных баков.
7. Основные схемы тягоизмерительных устройств и особенности их работы.
8. Методы имитации высотных условий при испытании.
9. Цели и методы гидро- и пневмоиспытаний агрегатов ЖРД.

ГЛАВА 6
АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ

6.1. ЗАДАЧИ АВТОМАТИЗАЦИИ ИСПЫТАНИЙ. СТРУКТУРА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

С особенностями ЖРД как объекта испытаний связаны требования к контролю его текущего состояния и обработке информации, полученной в процессе его испытания. Достоверность оценки состояния и контролируемых характеристик ЖРД определяется информативностью широкого класса каналов измерения. При этом контролируется состояние не только самого ЖРД, но и различных управляющих им и обслуживающих его систем, фиксируется значительное число параметров (иногда до нескольких сотен) за незначительный отрезок времени, определяемый продолжительностью испытания. Контроль за состоянием ЖРД и систем, а также получение информации об интересующих свойствах возможны только при автоматизации операций измерения и функционального анализа. Эти задачи решаются с помощью стендовых ИИС и автоматизированных систем диагностирования и аварийной защиты.

Стендовая ИИС представляет собой совокупность средств измерения, объединенных общим алгоритмом функционирования и предназначенных для автоматизации процесса получения информации о параметрах ЖРД и стендовых систем, ее преобразования для непосредственного восприятия оператором-испытателем, а также для передачи, обработки и представления в форме, необходимой для проведения анализа результатов испытания. Стендовая ИИС должна обеспечивать высокую точность и надежность средств измерений, дистанционность измерений и контроля, автоматическую работу всех входящих в нее элементов, возможность визуального контроля параметров ЖРД и стендовых систем по выбору оператора-испытателя, возможность выборочной обработки информации в темпе испытания, работу средств измерения и обработку полученной информации в режиме единого времени, защиту ЖРД в ава-

рийной ситуации, высокую помехозащищенность каналов сбора и передачи информации.

Информацию, получаемую в процессе испытания ЖРД, можно условно разделить на информацию о состоянии ЖРД (давления, тяга, расходы компонентов, температуры и т.д.) и информацию о внешних воздействиях на ЖРД (сигналы системы управления, температуры и давления компонентов в баках, давления наддува и т.д.).

Интерес к этой информации, а следовательно, и ряд требований к измерительным каналам могут быть различны в зависимости от вида анализируемых процессов – статических отклонений параметров или динамических режимов.

По назначению стендовые ИИС можно разделить на две группы:

ИИС, предназначенные для автоматизированного получения информации о работе ЖРД и стендовых систем, а также для представления ее в форме, удобной для наблюдения, регистрации, использования в процессе дальнейшей машинной обработки или непосредственного ввода в электронные вычислительные машины с возможностью оперативного получения результатов измерения в темпе испытания ЖРД;

ИИС автоматизированного контроля и управления, предназначенные для получения информации об отклонениях контролируемых величин (давлений, температур и т.д.) от допустимых значений.

Информация выдается на пульт управления испытанием для принятия оператором-испытателем решения о возможности дальнейшей работы ЖРД или в схему САЗ для его автоматического останова.

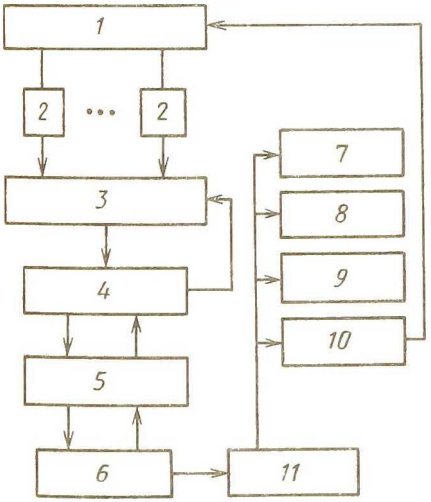


Рис.6.1. Структурная схема стендовой ИИС:
1 – ЖРД; 2 – канал измерительный; 3 – коммутатор групповой; 4 – устройство управления; 5, 11 – устройства входное и выходное; 6 – ЭВМ; 7 – система представления информации оперативная; 8 – устройство печатающее и графопостроитель; 9 – носители информации магнитные; 10 – САЗ

В стендовой ИИС (рис.6.1) информация с измерительных каналов через групповой коммутатор поступает на входное устройство ЭВМ. Устройство управления определяет режим работы и циклограмму функционирования ИИС. На выходе ЭВМ формируется требуемая информация, ЭВМ осуществляет контроль за текущим состоянием ЖРД. Часто САЗ представляет собой автономный блок, а информация, полученная с ИИС, используется для контроля правильности ее срабатывания.

Вследствие значительного числа измеряемых при испытаниях ЖРД параметров ИИС обычно строят по принципу временного разделения измерительных каналов. На практике для характеристики информативности ИИС используют частоту опроса параметра в каждом измерительном канале или частоту переключения измерительных каналов (число контролируемых точек измерения в единицу времени). Быстродействие современных стендовых ИИС составляет от десятков до нескольких тысяч измерений в секунду.

Важной характеристикой стендовой ИИС является надежность. Вследствие большого числа входящих элементов, рассредоточенности первичных преобразователей, значительной протяженности линий связи, высокого быстродействия, а следовательно, широкой частотной полосы пропускания сигнала, когда особенно заметно воздействие помех, вероятность отказа может быть значительной. Под отказом ИИС понимают превышение допустимой для данной ИИС погрешности, сбой в работе или прекращение ее действия. При создании стендовых ИИС принимают все меры, предотвращающие возможный отказ. Потеря информации с ИИС равноценна полному обесцениванию испытания ЖРД, что связано со значительными материальными затратами.

Первичные преобразователи в измерительных каналах ИИС различаются по принципу действия и, как правило, имеют различные по характеру и диапазону изменения выходные сигналы. В связи с этим в структуру измерительных каналов включают унифицированные преобразователи, которые приводят многообразие выходных сигналов к тому или иному стандартному интервалу (0...5, 0...10 мА; 0...10 В и т.д.). Унифицированные преобразователи могут быть индивидуальными или групповыми. В последнем случае они подключаются к первичным преобразователям с помощью электронных коммутаторов.

Для индикации и регистрации полученных при испытаниях результатов в форме, удобной для пользования в ИИС, применяют специальные

устройства представления информации, которые можно разделить на две основные группы:

оперативные устройства представления, предназначенные для кратковременного хранения и оперативной (в темпе испытания) выдачи результатов измерений;

регистрирующие устройства представления, фиксирующие результаты измерений на каком-либо носителе (магнитной пленке) и позволяющие осуществлять многократное обращение к ним в процессе вторичной обработки.

Оперативные устройства представления позволяют зрительно воспринимать выведенную на них информацию. Широкое распространение в стендовых ИИС получили алфавитно-цифровые дисплеи типа "Видеотон" – универсальные устройства ввода–вывода средней скорости. Эти устройства позволяют получить по заложенной программе информацию непосредственно с ЭВМ, минуя промежуточные носители, изготовить копии содержимого экрана по желанию оператора-испытателя.

Регистрирующие устройства представления обеспечивают возможность многократно обращаться к полученной при испытании информации. Условно регистрирующие устройства представления можно разделить на два типа: промежуточные и конечные. Информация с промежуточных регистрирующих устройств (например, с магнитных аналоговых или дискретных регистраторов), как правило, не предназначена для непосредственного восприятия человеком. В качестве конечных регистрирующих устройств чаще всего используют штатные печатные механизмы ЭВМ (например, АЦПУ). Работа АЦПУ обеспечивается заранее вводимой в ЭВМ программой с выдачей знаковой информации на печать в масштабе реального времени. Другим примером конечных регистрирующих устройств представления информации являются графопостроители, их работа также осуществляется по программе, введенной заранее в ЭВМ. В результате на планшете регистрирующего устройства в заданном масштабе по отклонению и времени вычерчивается график изменения параметра в процессе испытания.

Особое место среди регистрирующих устройств занимают шлейфовые осциллографы. Вытесненные при испытаниях ЖРД современными автоматизированными ИИС, они применяются при лабораторных испытаниях и некоторых видах специальных испытаний ЖРД (при испытаниях САЗ, динамических испытаниях). Несомненным их преимуществом является простота и надежность регистрации, а также возможность более

точного определения тенденции изменения параметров ЖРД при быстром развитии аварии. Это в значительной мере уменьшает неопределенность ситуации при анализе, которая может возникнуть при использовании дискретных регистрирующих устройств из-за потери информации в промежутке между точками измерения. На установившихся же режимах работы ЖРД информация, зарегистрированная на ленте осциллографа, может быть автоматически обработана с помощью специальных устройств считывания графической информации (преобразователей каротажных диаграмм, сканирующих оптических преобразователей).

Стендовые ИИС представляют собой сложные многозвенные системы, состоящие из большого числа измерительных каналов, коммутаторов, устройств синхронизации, управления, обработки и представления информации. Поэтому с особой остротой встают вопросы метрологического обеспечения.

Существующие образцовые средства измерений, как правило, стационарные, трудно подводить к ИИС, установленной в непосредственной близости к испытательному стенду, а в ряде случаев их вообще невозможно использовать в условиях стенда. Поэтому для обеспечения достоверности результатов измерений при стендовых испытаниях ЖРД нужны специализированные системы метрологического обеспечения ИИС, а также специальные встроенные в ИИС образцовые средства. В ряде случаев метрологические характеристики ИИС в стендовых условиях оценивают по нормативным метрологическим характеристикам ее звеньев. Для сокращения цикла метрологических испытаний стендовых ИИС следует ограничиваться поэлементной поверкой отдельных ее блоков, метрологические характеристики которых нормируются.

Рассмотрим функциональную структуру ИИС, которая определяет комплекс необходимого математического обеспечения для преобразования и обработки измерительной информации.

На вход ИИС поступает совокупность сигналов об изменении физических параметров $\{x_i\}_{i=1}^{N}$ (рис.6.2), преобразуемых первичными преобразователями в совокупность электрических сигналов $\{\bar{y}_i\}_{i=1}^{N}$, которые после преобразования унифицируются. Они определяются выражением

$$\bar{y}_i = c_i(x_i)\varphi_i(\tau, x_i)W_i(s), \quad i = 1, \ldots, N, \tag{6.1}$$

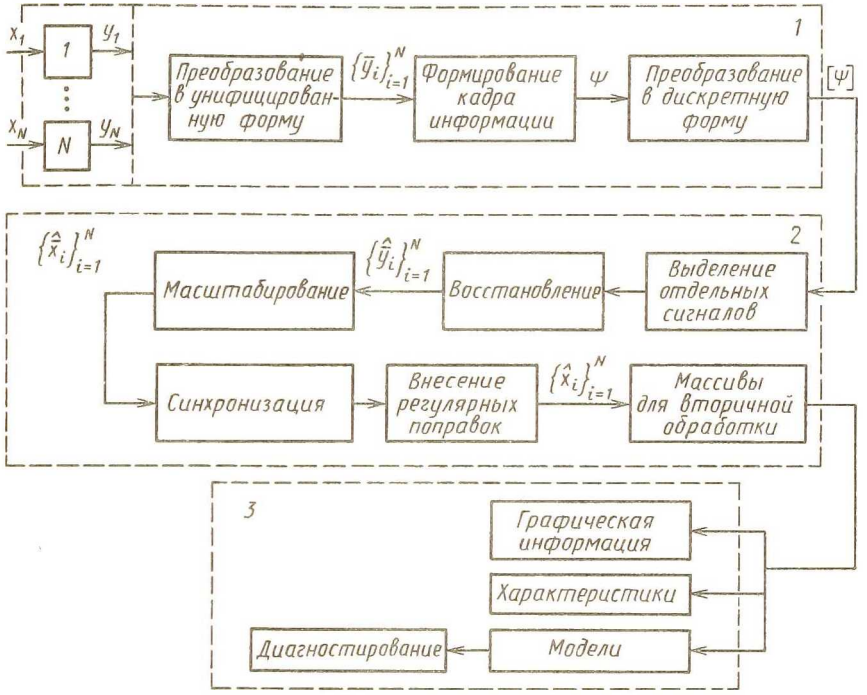


Рис. 6.2. Модель преобразования информации в ИИС:
1 – канал измерительный; 2 – система обработки; 3 – устройство представления выходной информации

где $\bar{y}$ – унифицированное значение y; $c_i(x_i)$ – функция, учитывающая градуировочные характеристики измерительного канала; $\varphi_i(\tau, x_i)$ – функция, учитывающая спектральные преобразования; $W_i(s)$ – функция, учитывающая динамические характеристики измерительного канала; s – оператор Лапласа.

Операция $\Psi\{y_i\}_{i=1}^{N}$ представляет собой формирование кадра информации, который определенным образом формируется в многомерный сигнал

$$\Psi(\tau) = \sum_{i=1}^{N} c_i(x_i)\varphi_i(\tau, x_i)W_i(s) + \sum_{i=1}^{q} y_j. \qquad (6.2)$$

Сигнал $\sum_{i=1}^{q} y_j$ представляет собой совокупность q служебных сигналов, вводимых для распознавания кодовых групп, и отдельных сигналов при обработке информации. Для повышения помехоустойчивости при передаче сигналов по каналу связи многомерный сигнал $\Psi(\tau)$ кодируется в виде многомерной функции $[\psi]$, каждая компонента которой квантована по уровню и дискретизирована во времени.

Далее выполняются операции выделения отдельных сигналов, обнаружение и восстановление сигнала на фоне шумов. В результате формируется совокупность оценок сигналов $\{\hat{\bar{y}}_i\}_{i=1}^{N}$. После масштабирования с учетом градуировочных характеристик измерительных каналов формируется совокупность оценок измеряемых параметров ЖРД $\{\hat{\bar{x}}_i\}_{i=1}^{N}$, на основании которых после приведения к единому времени, отбора существенных значений и внесения регулярных поправок рассчитываются физические величины и характеристики, получаемые путем косвенных измерений. Исправленные окончательные значения оценок физических параметров $\{\hat{x}_i\}_{i=1}^{N}$ и характеристик являются исходными для формирования результатов испытания ЖРД.

Формально часть операций преобразования информации в ИИС детерминирована (преобразование в унифицированную форму, преобразование в дискретную форму, масштабирование). Некоторые же операции (обнаружение, восстановление полезного сигнала, индентификация) носят статистический характер. Смесь полезного сигнала и помех на входе ИИС может в общем случае характеризоваться наличием корреляционных связей. Однако для большинства практических задач эта совокупность представляется аддитивной:

$$x_i(\tau) = x_i(\tau, \bar{r}) + x_{in}(\tau), \qquad (6.3)$$

где $x_i(\tau, \bar{r})$ – регулярная часть полезного сигнала, представляемая в виде функции времени известной структуры и вектора случайных параметров $\bar{r}$; $x_{in}(\tau)$ – случайная функция времени с нулевым математическим ожиданием.

В ИИС по мере преобразования входного сигнала происходит накопление погрешности, добавляются внутренние помехи. Поэтому сигнал,

поступающий на обработку, характеризуя случайный процесс, может существенно отличаться по своей структуре и статистическим характеристикам от входного сигнала. Для отработки процесса измерений, т.е. получения отдельных оценок измеряемых величин, обработки эксперимента в целом и определения оценки свойств ЖРД необходимо знание структуры и статистических характеристик сигнала, поступающего на обработку.

Структура сигнала с его статистическими характеристиками называется моделью измерительной информации. Структура модели измерительной информации может представлять собой непрерывный случайный процесс, дискретный случайный процесс, непрерывную или случайную дискретную последовательность. Измерительная информация большинства многомерных ИИС описывается в виде дискретных случайных последовательностей. Формы представления их в выходных устройствах ИИС могут быть самыми различными в зависимости от целей и задач испытаний.

6.2. МЕТОДЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О ПАРАМЕТРАХ ЖРД

Анализ результатов испытаний ЖРД – это, как правило, оценка:

1) статических характеристик и параметров ЖРД (удельного импульса, расходного комплекса, дроссельной характеристики, соотношения компонентов, тяги и т.д.);

2) параметров переходных процессов при запуске, останове и регулировании ЖРД на основном режиме, в случае сравнительно медленного развития аномалии, а также свободных колебаний его параметров;

3) вибрационного состояния ЖРД, пульсаций его параметров, а также исследование изменения параметров при быстром развитии аварии.

Если выполнение первого пункта требует чисто статических оценок, то два других связаны с необходимостью повысить точность динамических информационных каналов. Это и определяет способы представления информации об испытании ЖРД. Специфика представления информации обусловлена еще и видом анализа (оперативный, требующий получения информации в темпе испытаний или непосредственно после его проведения или полный). Некоторая информация о параметрах ЖРД при испытании визуализирована для контроля оператором-испытателем

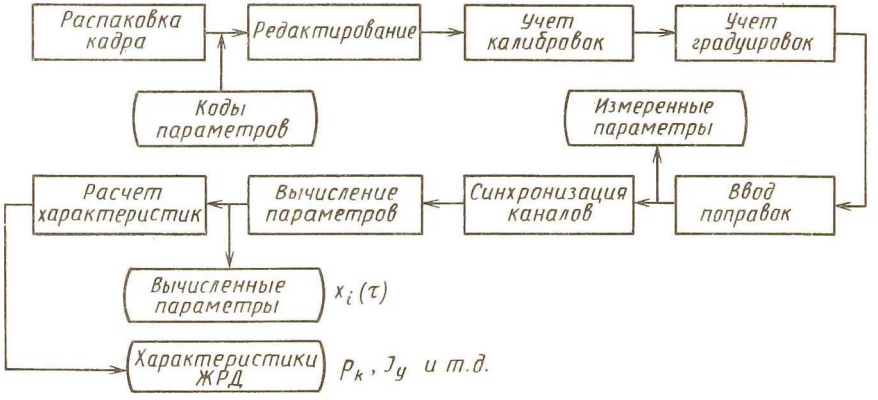


Рис. 6.3. Последовательность преобразования информации в автоматизированной ИИС

(остаток компонентов топлива в баках, тяга или давление в камере, давление наддува).

Основной же массив информации регистрируется с помощью магнитных устройств и подлежит последующему преобразованию, например, по схеме, представленной на рис.6.3.

Простейшие результаты обработки (коды измеренных параметров) получают после распаковки кадра измерительной информации и селекции параметров из кадра для обработки. Эти результаты представляются в виде графических зависимостей кодов от времени (обзорных графиков).

По мере дальнейшего преобразования информации увеличивается достоверность, точность и степень обобщения экспериментальных данных.

Для определения физических значений измеряемых параметров выполняют следующие операции:

1. Редактирование измерительной информации, в процессе которого выявляют грубые ошибки (сбои) в измерениях, восстанавливают информацию на этих участках, проводят операции сглаживания, снижающие уровень помех. Наиболее распространенным методом построения алгоритмов сглаживания является метод наименьших квадратов. Пусть $x(\tau)$– результат наблюдения процесса, подлежащего фильтрации на интервале $\tau_1 \ldots \tau_N$. Алгоритм обработки предполагает минимизацию суммы квадратов отклонения этого сигнала от некоторой функции $\varphi(\tau)$ =

$= \varphi(a_0, a_1,\ldots,a_r,\tau_j)$, заданной параметрически, т.е. минимизируется функционал вида

$$\sum_{j=1}^{N} \{\varphi(a_0, a_1,\ldots, a_r, \tau_j) - x(\tau_j)\}^2, \qquad (6.4)$$

где $a_0, a_1,\ldots, a_r$ – некоторые параметры, определенные одним из выбранных оператором способов.

Хотя эта операция выглядит просто, на практике она в значительной мере определяет производительность системы обработки, так как предполагает, по крайней мере, N-1 операций пересылки, N умножений и N сложений.

Используются и некоторые статистические методы отбраковки результатов измерений. Как правило, они основаны на анализе разности между сглаженным или экстраполированным значением и единичным результатом измерения. Сравнение этой разности с некоторой константой, зависящей от погрешности измерений канала, позволяет сделать вывод об аномалии данного дискретного значения параметра. Конечно, эти приемы годятся для обработки результатов на участках времени безаварийного функционирования ЖРД.

2. Учет калибровочных характеристик, исключающий влияние изменения напряжения питания преобразователей и других флуктуаций характеристик тракта регистрации на результаты измерений.

3. Учет градуировочных характеристик, в результате которого осуществляется пересчет условных величин в абсолютные значения физических параметров.

4. Ввод поправок, учитывающих систематические, методические и инструментальные погрешности измерений.

После операций синхронизации каналов возможна выдача промежуточной информации в виде дискретных функций $x_i = x_i(\tau)$ с заданной частотой опроса. Эта информация представляется в виде таблиц или графиков, которые достаточны для анализа статических характеристик и параметров ЖРД, а также для получения информации о медленноменяющихся или низкочастотных процессах. По желанию инженера-испытателя, занимающегося анализом, и эта информация может быть получена автоматически на графопостроителях с выдачей, например, дроссельной характеристики ЖРД в диапазоне изменения регулируемых параметров при данном испытании и графиков изменения параметров ЖРД при запуске и останове.

Эта информация обязательна в документе о результатах испытания ЖРД.

Особый подход реализуется при обработке информации о быстропеременных процессах. Экспресс-анализ результатов измерений пульсаций давления, вибраций проводится с помощью информации, полученной на аналоговых средствах регистрации.

Подробный анализ дискретной информации проводится по алгоритмам корреляционного и спектрального анализа [4]. Иногда такие же операции проводятся над информацией о медленноменяющихся процессах, например при специальных частотных испытаниях или при реализации алгоритмов технического диагностирования.

Информация о динамическом процессе в виде корреляционной функции R и спектра S позволяет достаточно полно судить о степени его стационарности и является весьма чувствительной к возможным изменениям состояния ЖРД. В системах автоматизированной обработки она представляется в табулированном или графическом виде относительно $R[x_i(\tau)]$, $S[x_i(\tau)]$.

6.3. ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ИСПЫТАНИЙ

В процессе развития экспериментальных научных исследований все более важную роль начинают играть средства автоматизации процессов сбора и обработки информации. Эта тенденция связана как с постоянно возрастающим объемом фиксируемой информации, так и с новыми требованиями к получаемым результатам.

Измерительная информация является фактически полуфабрикатом, из которого полезная информация может быть получена только после существенной переработки. Многочисленные алгоритмы обработки, как правило, сложны. Аппаратная реализация их в рациональной форме возможна лишь с использованием современной микропроцессорной техники. Современная вычислительная техника может хранить практически неограниченный объем информации в виде цифровых данных и совершать операции с ними со скоростями порядка миллиона действий в секунду.

Основным вопросом при использовании вычислительных средств является точное формирование ЭВМ или аппаратно-программному блоку директив по объему, последовательности операций обработки и форме

представления результатов. Необходимо также предусмотреть возможность контроля достоверности результата и определения вероятности погрешностей.

Естественным является и требование получить распечатку (твердую копию) всех проделанных операций с нужными комментариями и пояснениями. В связи с этим возникает проблема, связанная с формой выдачи директивы на ЭВМ, с местом ее промежуточного хранения, способом передачи ее в ЭВМ и контролем всех операций. Следует также иметь в виду и колоссальный объем измерительных, служебных, контрольных данных, который достигает при испытаниях сотен миллионов значений.

Все это требует основательной подготовки к автоматизации испытания, при этом последовательно решают следующие задачи:

1. Формируют характеристики входного потока информации при испытании, отражающие число измеряемых параметров, места их измерения, требования по точности в статическом и динамическом режимах измерения, время экспозиции и т.д.

2. Производят предварительный расчет объема и интенсивности информационного потока (байт и байт/с), поступающего с объекта испытаний.

3. Определяют множество действий над данными входного потока, которые необходимо совершить для получения требуемых результатов, а также последовательность проведения этих действий. Фиксируют временные сечения и параметры промежуточного контроля за достоверностью данных.

4. Выбирают форму записи директив и алгоритмов обработки в ЭВМ, места хранения этих директив, а также определяют потребный объем памяти.

5. Выбирают методы управления испытаниями в реальном времени и возможные средства управления.

6. Выбирают структурную и функциональную схемы автоматизированного комплекса испытаний.

7. Формируют программу функционирования системы автоматизированного испытания и определяют вид документирования полученных результатов.

Автоматизированное испытание предусматривает унификацию используемых средств, методов и технологических приемов, что обеспечивает измерения с максимальной надежностью и возможность оперативной перестройки алгоритмов обработки экспериментальных данных. При этом часто используется понятие интерфейс, что означает совокупность аппаратных и программных средств, которые обеспечивают сов-

местимость различных блоков, входящих в измерительную систему. Интерфейсы, как правило, стандартизированы, что существенно упрощает комплексирование объектов, обеспечивает оперативность и уменьшает затраты на формирование больших функциональных систем из отдельных блоков.

Для автоматизации испытаний применяют ряд стандартных интерфейсов – КАМАК, Общая шина, Единая шина.

Испытываемый ЖРД можно представить в виде совокупности информационных объектов, которые обозначим символом E с индексом. Так, информационный объект E_1 представляет собой конечное множество выбранных для измерения параметров ЖРД (тяга, давления, расходы, температуры и т.д.). Обозначим в общем виде действия, которые выполняются в процессе обработки этого информационного объекта, символом $\vec{R}_{ij}$, где R – отношение одного объекта к другому, верхняя стрелка означает активный характер этого отношения, а двойной индекс определяет объект, над которым производится действие (i), и объект, который формируется в результате этих действий (j).

К действиям $\vec{R}_{1,2}$ относятся:

выбор измеряемых параметров для анализа свойств ЖРД;

реализация самого процесса измерения, когда для каждого параметра определяются соответствующие ему амплитуда аналогового сигнала или цифровой эквивалент;

стандартизация выходных сигналов, т.е. приведение их к унифицированным диапазонам (для цифровых значений – 0...100; 0...1000 дискретных величин на весь диапазон измерения);

определение методов и средств хранения измеренных значений до начала их обработки (цифровые индикаторы, магнитные носители, полупроводниковые элементы памяти).

Все средства, реализующие указанные действия, в совокупности называются устройствами связи с объектами и могут быть реализованы с помощью микропроцессорной техники. В этом случае возможно создание многоканальных программно-управляемых подсистем, в которых оперативно и гибко перестраиваются порядок, частота опроса измерительных каналов, чувствительность, режим измерения, слежение за нулевым уровнем, коррекция, первичная обработка данных и т.п.

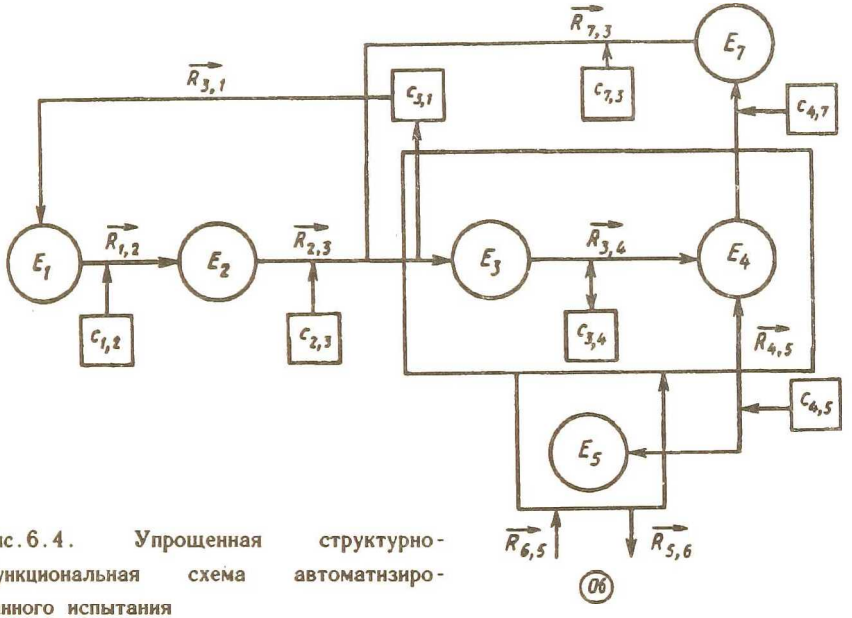


Рис.6.4. Упрощенная структурно-функциональная схема автоматизированного испытания

Для большинства случаев построения автоматизированных комплексов требуется специальная разработка устройств связи с объектами.

После этапа измерения вся цифровая информация хранится, как правило, в позиционном виде, т.е. на магнитном носителе или в блоке памяти, где все значения располагаются последовательно, каждый отсчет имеет свою позицию, которая заранее определена и описана. Допустимая погрешность позволяет определить разрядность ячейки, в которой будет храниться значение параметра.

Разрядность определяется в байтах. Байт – часть машинного слова, состоящая из восьми двоичных разрядов, в которой можно хранить значения целых чисел от 0 до $255(2^8-1)$. Машинная память разбита на байты, адреса которых линейно возрастают. К каждому байту возможна непосредственная адресация.

Интенсивность входного потока информации должна обеспечиваться соответствующей пропускной способностью каналов, связывающих объект испытания с ЭВМ.

Упрощенно структурно-функциональная схема автоматизированного испытания представлена на рис.6.4.

Свойства реального объекта представляются в виде информационного объекта с информационным множеством E_1. В условиях реального испытания это множество трансформируется в информационное множество E_2, характеризующееся конечным числом измеряемых параметров ЖРД, по которым определяются его свойства:

E_3 – множество цифровых эквивалентов измеренных параметров ЖРД, записанное в оперативное запоминающее устройство ЭВМ;

E_4 – множество численных значений, характеризующих результаты обработки входного потока данных;

E_5 – визуальная модель множества E_4, представленная в удобном для восприятия оператором-испытателем виде;

$Об$ – схематическое представление оператора-испытателя;

E_7 – информационный объект, отражающий результаты обработки и зафиксированный во внешней памяти ЭВМ для длительного хранения.

Все прямоугольники на схеме условно отражают аппаратно-программные средства, реализующие соответствующие действия: $c_{1,2}$ реализует действие $\vec{R}_{1,2}$, $c_{2,3}$ – действие $\vec{R}_{2,3}$ и т.д.

Изображенные на схеме объекты представляют собой функциональные сечения, определяющие состояние информационного потока после соответствующего этапа обработки.

После этапа измерения формируется объект E_2, элементы которого (как правило, это цифровые эквиваленты измеренных параметров E_1) распределены во времени и пространстве состояний и недоступны центральному процессору ЭВМ. Возникает проблема ввода полученных данных в оперативную память ЭВМ – действие $\vec{R}_{2,3}$. В результате реализации $\vec{R}_{2,3}$ с помощью унифицированных средств ввода (на схеме $c_{2,3}$) в памяти ЭВМ формируется объект E_3, представляющий собой массив входных данных, подготовленный для дальнейшей обработки. Связь объекта E_2 с объектом E_3 стандартизирована, а действия $\vec{R}_{2,3}$ определены протоколом обмена, который соответствует выбранному стандарту сопряжения.

Разнообразие работ по автоматизации, в том числе и испытаний, обусловливает необходимость использования блочного принципа построения систем путем их агрегатирования из стандартных блоков и модулей. Составляющими таких систем служат унифицированные функциональные элементы, которые можно применять в разных сочетаниях. Стандартизируют не только устройства ввода (или вывода), но и все другие функциональные блоки и модули (на схеме – $c_{i,j}$). Под функциональным элементом понимают совокупность схемных элементов, объединенных электрически, логически или конструктивно в единое устройство, которое в автоматизированной системе выполняет определенную функцию. Из нескольких функциональных элементов, реализующих выполнение простых функций, можно построить элемент более высокого уровня. В этих условиях стандартизация интерфейсов имеет большое значение.

Стандартные средства обработки данных в ЭВМ (на схеме $c_{3,4}$) представляют собой ее центральный процессор, функционирующий под управлением операционной системы.

Операционная система – это набор программных средств системного уровня, обеспечивающий сервисные возможности ЭВМ (редактирование, отладку и т.д.). В операционную систему включают те программные компоненты, которые без изменения могут быть использованы для решения различных прикладных задач.

Таким образом, центральный процессор по заданной программе производит выборку нужных данных из множества E_3, обрабатывает эти данные по заранее введенным алгоритмам, в результате формируется информационный объект E_4 (результаты обработки). По команде оператора-испытателя $Об$ результаты обработки могут быть выведены на визуальный контроль (объект E_5) в виде графика, кадра, таблицы.

Средства, реализующие действия $\vec{R}_{4,5}$, называют подсистемами отображения информации (на схеме $c_{4,5}$). Они являются периферийными устройствами ЭВМ. В этом качестве широко применяют алфавитно-цифровые дисплеи, графические или универсальные устройства. Дисплеи выполняют еще очень важную функцию в системах автоматизации – они обеспечивают оператору-испытателю возможность обратной связи с ЭВМ. С помощью клавиатуры дисплея можно вводить в ЭВМ нужную ин-

формацию, управлять процессами обработки, обращаться к необходимым программным средствам и т.п.

Все эти действия на схеме обозначены символом $\vec{R}_{6,5}$, а $\vec{R}_{5,6}$ – это действия, определяющие восприятие оператором-испытателем данных, представленных визуальной моделью E_5.

Результаты обработки (объект E_4) могут быть транслированы во внешнюю память ЭВМ (объект E_7) также с помощью стандартизированных средств $c_{4,7}$. Существует множество устройств внешней памяти: магнитный ленточный накопитель; магнитный дисковый накопитель; гибкие диски и т.д. Внешнюю память используют для организации архивов и библиотеки данных, баз данных длительного хранения больших объемов информации. При необходимости массивы данных из E_7 с помощью средств $c_{7,3}$ могут быть опять введены в оперативную память ЭВМ (действие $R_{7,3}$) для обработки.

При управляемом эксперименте в обобщенную структуру автоматизированного эксперимента вводят специализированные средства $c_{3,1}$, с помощью которых осуществляются непосредственные воздействия на объект испытания в реальном времени, т.е. тогда, когда требуется немедленное вмешательство в процесс испытания (аварийное выключение).

Для управляемого эксперимента характерно автоматическое изменение режима работы средств $c_{3,4}$, которые в реальном времени могут изменить алгоритм обработки, выдать нужную информацию на любое устройство. Например, при испытаниях САЗ ЖРД при возникновении необратимой аварийной ситуации возможна как подробная фиксация ее развития, так и своевременная выдача команды на выключение ЖРД.

Описанная структура автоматизированной системы испытаний ЖРД может быть реализована на современной элементной базе, что позволяет сделать ее более гибкой, надежной и простой в эксплуатации.

При создании автоматизированных систем обработки испытаний широко применяют интерфейс КАМАК, который представляет собой модульную агрегатную систему для связи измерительных устройств с цифровой аппаратурой обработки данных. Для обеспечения совместимости функциональных элементов (модулей) интерфейс регламентирует конст-

руктивные, электрические и логические параметры функционирования и взаимодействия между модулями.

КАМАК в странах СЭВ рекомендован в приборостроении.

Наименьшая конструктивная единица системы — модуль (станция) представляет собой вставную кассету. Совокупность кассет размещается в каркасе (крейте). Каждый модуль имеет стандартный разъем для присоединения к горизонтальной магистрали крейта, по которой осуществляется передача сигналов и питание модулей. Для управления модулями в крейтах используют цифровой контроллер или процессор. Он определяет режим функционирования всех модулей крейта и связывает центральную ЭВМ с магистралью.

Условия адресации модулей, задание на выполнение ими тех или иных функций, обработка сигналов и кодов управления, контроль состояния всех компонентов крейта в интерфейсе КАМАК ориентированы на пользователя, т.е. язык программирования проблемно ориентирован. Это упрощает сами операции программирования, снижает их трудоемкость и освобождает разработчика от необходимости детального анализа организации обмена между модулями и ЭВМ.

КАМАК допускает оперативное перестроение всей системы без принципиального изменения связей.

Модули крейта, как правило, функционально ориентированы на измерение параметров, сбор, ввод, хранение, обработку информации, отображение параметров, управление ими и т.д. Причем по каждой из функций существуют или могут быть разработаны модули в виде параметрического ряда, которые выполняют одну и ту же функцию, но с разными возможностями по характеристикам. Так, модули связи с объектом испытаний могут отличаться точностными параметрами, частотным диапазоном, сложностью алгоритмов обработки измеряемой информации, режимом опроса и т.д. Набор таких модулей может удовлетворять требования по испытаниям различных ЖРД в различных условиях, заданных программой испытаний.

Для автоматизации достаточно сложных испытаний интерфейс КАМАК эффективен и экономически выгоден, но не соответствует современному уровню техники. Большие габаритные размеры, значительное энергопотребление, избыточность элементов, относительно низкое быстродействие говорят о его неперспективности. В настоящее время разрабатывают специализированные системы автоматизации испытаний, которые значительно расширяют возможности обработки экспериментальной информации и повышают ее эффективность. Наиболее перспективным является направление по разработке систем, основанных на принципе

"развивающегося ядра". В основе таких систем лежит модульный набор функциональных элементов базового типа, который может быть развит и адаптирован к любым условиям и требованиям.

Из функционирующих в настоящее время автоматизированных систем обработки результатов измерений при испытаниях можно отметить систему Темп. Это двухуровневая система, на нижнем уровне которой строится сопряжение с измерительными средствами и производится обработка данных в объеме, необходимом для предварительного и оперативного анализа результатов испытаний. На верхнем уровне производится сбор, хранение, вторичная обработка и автоматизированный анализ данных, документирование. Систему Темп можно модернизировать по числу и составу подсистем ввода–вывода, по составу общего и специального программного обеспечения. Она может работать с ЭВМ СМ и ЕС.

6.4. СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Для создания высокоэффективного и надежного ЖРД необходимо проведение испытаний с целью проверки его работоспособности за пределами, оговоренными ТЗ и ТУ, а также при имитации развития аварийных ситуаций в системах летательного аппарата. В связи с этим испытательные стенды оборудуют системами САЗ, которые могут входить как в состав ИИС, так и быть автономными.

Наличие САЗ позволяет экономить материальные средства, отпущенные на доводку ЖРД, так как его выключение на ранней стадии развития аварии позволяет сохранить ЖРД полностью или отдельные его агрегаты, предотвращает разрушение и пожар на стенде. Раннее выключение ЖРД в значительной мере упрощает операции по анализу причин развития аварийной ситуации. В некоторых схемах ракет-носителей САЗ используется при летно-конструкторских испытаниях, и даже на стадии штатной эксплуатации.

Создание САЗ включает разработку метода диагностирования, определение состава контролируемых параметров, метода их измерения и последующего преобразования полученной информации. Последние операции можно эффективно провести с помощью стендовой ИИС.

При разработке метода технического диагностирования всегда выделяют три группы задач, связанных с построением модели объекта, выбором средств реализации процедуры постановки диагноза и созданием диагностического комплекса.

Построение модели включает: детальное изучение свойств объекта диагностирования в нормальном состоянии, разделение его на элементы и установление связей между ними, выделение возможных состояний объекта, анализ технических возможностей средств контроля признаков технических состояний, сбор и обработку статистических данных о распределении вероятностей состояний объекта диагностирования и закономерностей проявления отказов его элементов (здесь возможно использование данных о двигателе-прототипе) и, наконец, выбор форм представления модели двигателя. Решение большинства перечисленных задач основывается на экспериментальных исследованиях или проведении расчетов на достаточно адекватных моделях.

Разработка процедуры постановки диагноза включает: выбор самого метода диагностирования и методов построения диагностических тестов, построение оптимальных процедур диагностирования. В основном эти задачи решают с использованием методов математического моделирования.

Создание диагностического комплекса связано с разработкой принципов построения диагностических систем и выбором способов их аппаратурной реализации, с оценкой диагностических систем по быстродействию, надежности, информативности, достоверности диагноза и технико-экономической эффективности, а также с определением связей системы диагностирования с объектом.

Таким образом, перечисленные задачи служат программой для разработки алгоритма функционирования диагностической системы и построения на ее основе САЗ.

В современных технических системах применяются тестовый и функциональный диагнозы. Отличительной особенностью первых является возможность подачи на объект специально сформированных тестовых входных сигналов. Применительно к ЖРД такая возможность, как правило, исключена. Для этого класса двигателей возможно применение в основном систем функционального диагноза, когда на вход в объект поступают только рабочие воздействия, т.е. объект исследуется в режиме нормального функционирования.

Перед началом работы производится настройка системы, т.е. в нее вводится информация о типе объекта, режиме, условиях работы. В современных системах технического диагностирования его алгоритм реализуется в виде команд ЭВМ, подаваемых на исполнительные устройства. Выходные реакции объекта оцениваются, рабочие воздействия измеряются и направляются в блок обработки сигналов. Здесь для по-

вышения точности измерений сигналы приводятся к унифицированной форме, производится фильтрация и т.п.

Преобразованные сигналы поступают в ЭВМ, где вычисляются оценки параметров, заданнных показателей качества. Оценки параметров и показателей качества, а также допуски на эти величины поступают в схему принятия решений. Блок выходных устройств выдает информацию (чаще релейного типа) о способности системы выполнять свои функции, иногда – о характере и месте неисправности.

Системы технического диагностирования таких объектов, как ЖРД, являются сложными динамическими системами, поэтому их создание требует решения ряда трудоемких задач, связанных с достаточностью и точностью информации о параметрах ЖРД, а также с эффективностью его математических моделей, используемых для выбора структуры и состава САЗ.

Наиболее распространены функциональный, вибрационный и акустический методы диагностирования.

При методе функционального диагностирования используется известная совокупность входных воздействий, включающая возмущающие факторы, совокупность выходных параметров, операторы связи между входными и выходными сигналами.

Для вибрационного и акустического метода диагностирования характерны однотипные источники информации о колебаниях элементов конструкции или рабочей среды.

Рассмотрим возможные варианты функциональных САЗ. Логично предположить, что структура САЗ может быть построена по принципу контроля предельных значений параметров, так как основная ее задача состоит в предотвращении аварии (рис.6.5). Такой способ контроля

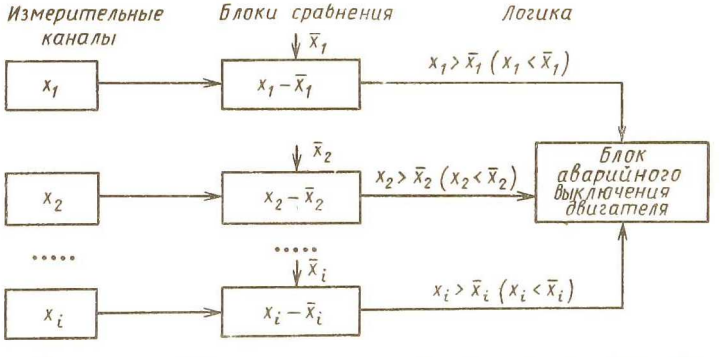


Рис.6.5. Структура САЗ, контролирующей предельные значения параметров

сводится к контролю одного или нескольких параметров ЖРД и выдаче команды на аварийное выключение при достижении хотя бы одним из контролируемых параметров $\bar{x}_1, \ldots, \bar{x}_i$ предельно допустимого заранее назначенного конструктором значения (максимального или минимального).

Алгоритм функционирования такой САЗ относительно прост, что способствует созданию простой и надежной аппаратуры контроля, обеспечивающей возможность использования контактных сигнализаторов.

Важнейшей задачей при создании САЗ является выбор совокупности контролируемых параметров. Ее решение связано с нахождением рационального компромисса для противоречивых концепций, а именно:

система должна быть надежной как по своевременному формированию аварийного сигнала, так и по предотвращению выдачи ложных команд, последнее обстоятельство требует сокращения числа контролируемых параметров;

система должна быть эффективной при возможно большем числе различных аварийных ситуаций, это требование приводит к необходимости увеличения числа контролируемых параметров.

Решение в этом случае может быть найдено:

моделированием аварий с использованием математической модели ЖРД и определением наиболее чувствительных параметров к возможно большему числу аварийных ситуаций;

функциональным анализом отказов отдельных агрегатов как невыполнения заданных им функций;

при использовании опыта доводки и эксплуатации двигателей-прототипов.

В качестве контролируемых параметров в таких САЗ могут быть выбраны: давления, температуры рабочего тела, частота вращения ротора ТНА и т.д.

Существенный недостаток САЗ, построенных по принципу контроля предельных значений, заключается в выборе уровней настройки каналов из условия обеспечения высокой надежности по отсутствию ложных срабатываний. При расчете предельных значений учитывается влияние на контролируемый параметр большого числа факторов (температуры и давления компонентов топлива на входах в насосы, изменения режимов работы ЖРД по тяге и соотношению компонентов топлива, разброса значений параметра из-за допустимых отклонений характеристик узлов, ошибки в настройке и т.д.). В результате предельные значения контролируемых параметров относительно далеки от значений этих па-

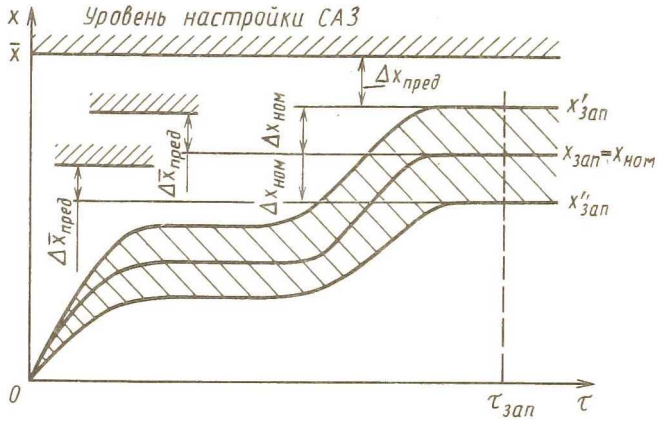


Рис. 6.6. Разброс контролируемого параметра на номинальном режиме

раметров на наиболее вероятных режимах работы ЖРД. Это приводит к потере чувствительности САЗ, так как в некоторых случаях развития аварийной ситуации контролируемые параметры не достигают своих предельных значений, на которые настроены каналы, до начала опасных разрушений. Анализ статистики настройки САЗ показывает, что существенно повышает предельные значения контролируемого параметра (до 50 %) учет разброса характеристик узлов и ошибок в их настройке.

Указанных недостатков не имеет САЗ, построенная по принципу контроля приращения параметра. Имеется в виду, что в условиях стендовых испытаний и при эксплуатации ЖРД в составе ракетной системы на участке запуска существует интервал, когда ЖРД работает на номинальном режиме относительно таких параметров, как тяга и соотношение компонентов топлива. Это дает возможность зафиксировать и запомнить на номинальном режиме $x_{зап}$ в момент $\tau_{зап}$. В дальнейшем система контролирует приращение параметра Δx относительно зафиксированного значения $x_{зап}$. Превышение предельного приращения $\Delta \bar{x}_{пред}$, которое зависит только от режима и изменения внешних факторов, возможно лишь при возникновении аномалий в работе ЖРД.

На рис. 6.6 показаны возможные уровни аварийного выключения ЖРД для трех случаев: при номинальном значении параметра ($x_{зап} = x_{ном}$) и при предельных возможных значениях параметра в момент запомина-

ния из-за проявления технологического разброса (заштрихованная область) $x'_{зап} = x_{ном} + \Delta x_{ном}$ и $x''_{зап} = x_{ном} - \Delta x_{ном}$.

Естественно, работа такой САЗ возможна только после выхода ЖРД на номинальный режим. Процесс запуска при этом может контролироваться, как в ранее рассмотренной САЗ, т.е. по предельным отклонениям. Структура варианта модернизированной САЗ показана на рис.6.7.

Стремление к дальнейшему повышению эффективности контроля за состоянием работающего ЖРД приводит к учету в алгоритме построения САЗ и режимных факторов. Действительно, диапазон регулирования современных ЖРД как по давлению в камере сгорания $p_к$, так и по соотношению компонентов топлива K достаточно широк. В связи с этим выбранные для контроля диагностические параметры также могут изменяться в широких пределах. На рис.6.8 видно, что при развитии аварийного состояния на режиме глубокого дросселирования для выключения ЖРД должно произойти существенное увеличение контролируемого параметра (на Δx_2). В то же время выход параметра на границы его допустимого значения на этом режиме (приращение Δx_1) уже свидетельствует об аварийном состоянии. В таких случаях весьма эффективны алгоритмы диагностирования, основанные на анализе взаимосвязей между параметрами, например на контроле соответствия режимных параметров текущим внешним воздействиям. Так, если предположить, что наиболее существенное влияние на изменение параметра оказывают контуры регулирования тяги и соотношения компонентов топлива, то любые два независимые параметра всегда определяют режим его работы и, следовательно, значение любого третьего параметра может быть определено исходя из дроссельных характеристик ЖРД. Эта операция, естественно, может быть совершена с какой-то конечной точностью.



Рис.6.7. Структура САЗ, контролирующей отклонения параметров ЖРД

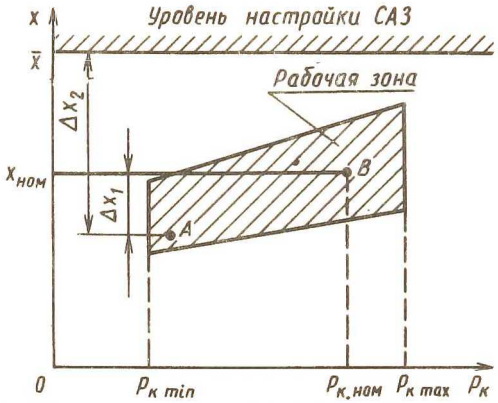


Рис.6.8. Поле значений контролируемого параметра в пределах регулирования:
***A* – режим дросселирования;**
***B* – режим номинальный**

Таким образом, для безаварийной работы ЖРД в предположении линейности дроссельных характеристик на определенном участке три независимых параметра x_1, x_2, x_3 связаны между собой неравенством

$$\Delta_1 = |A_1x_1 + A_2x_2 + A_3x_3 + D| \leq \bar{\Delta}_1, \qquad (6.5)$$

где A_1, A_2, A_3 – коэффициенты взаимосвязи, определяемые дроссельными характеристиками; D – постоянная; $\bar{\Delta}_1$ – нечувствительность системы, зависящая от отклонений внешних факторов, принятых допущений, погрешности измерений и способа преобразования информации.

Нарушение неравенства (6.5) свидетельствует о неисправности в ЖРД. Для построения САЗ могут быть выбраны любые три параметра, например давление в камере сгорания и давление за насосами окислителя и горючего (рис.6.9).

Так как взаимосвязь между параметрами в САЗ определена дроссельными характеристиками, для которых исходной внешней информа-

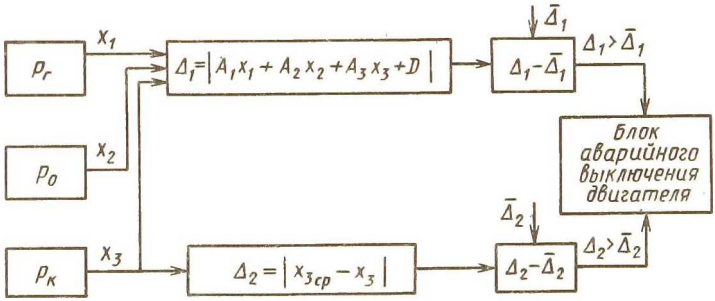


Рис.6.9. Структурная схема САЗ, контролирующей взаимосвязь между параметрами

цией являются положения регулирующих органов, то при отказе самих этих органов взаимосвязь может быть и не нарушена и сигнал об аномалии не будет зафиксирован. Чтобы эта информация все же прошла (пусть не на конечный блок аварийного выключения двигателя, а хотя бы в логику САЗ), в схему САЗ введен еще и блок контроля допустимых значений давления в камере сгорания, определяемых диапазоном регулирования ЖРД. Ограничение производится как по минимальному, так и по максимальному давлению в камере сгорания с использованием для этого соотношения

$$\Delta_2 = |p_{к.ср} - p_к| \leqslant \bar{\Delta}_2, \qquad (6.6)$$

где $p_{к.ср}$ – среднее значение давления в камере сгорания в диапазоне регулирования (на рис.6.9 $p_{к.ср}$ обозначен $x_{3ср}$); $\bar{\Delta}_2$ – допустимое отклонение давления от среднего значения.

Рассмотрим другие способы построения САЗ.

Вибрационный и акустический сигналы имеют широкий частотный диапазон и обладают значительной информативностью. Это преимущество достаточно успешно может быть использовано для диагностирования простых систем. Однако в сложных объектах, каким является ЖРД, отличающихся сильной функциональной зависимостью между узлами и разветвленной структурой, контроль за техническим состоянием с помощью этих методов не всегда практически осуществим.

Наиболее эффективными в этом отношении являются методы диагностирования, основанные на одновременном измерении многих сигналов с последующей статистической обработкой результатов измерений.

В то же время нельзя не отметить высокую чувствительность вибрационного и акустического сигналов к проявлению аномалий в ЖРД. В качестве признаков в вибрационном и акустическом методах диагностирования используют различные характеристики и параметры отфильтрованного сигнала. Широкое распространение получили признаки, связанные с энергией колебаний, например среднее значение амплитуды сигнала в конкретной полосе частот. В качестве признаков используют также различные энергетические и статистические характеристики сигнала.

Предпочтение обычно отдают спектральному анализу пульсаций параметров ЖРД, так как методически вопросы статистического анализа сейчас достаточно полно разработаны и доказали свою эффективность в различных областях техники.

Для описания частотной структуры пульсаций параметров рабочего процесса и исследования соотношений между случайными процессами в различных точках ЖРД важнейшей характеристикой является спектральная плотность.

Ограничимся здесь рассмотрением лишь акустического метода диагностирования (по пульсациям параметров), так как в отличие от вибрационного метода диагностирования этот метод более предпочтителен для ЖРД и его агрегатов. Это связано с возможностями эффективного использования динамических моделей процессов в ЖРД, достаточно хорошо разработанных в настоящее время, а также с большей стабильностью параметров пульсаций по сравнению с вибросигналами.

При численной оценке спектральной плотности стационарного процесса чаще всего применяют стандартный метод, при использовании которого спектральная плотность выражается через преобразование Фурье автокорреляционной функции. Если $x(\tau)$ – реализация стандартного случайного процесса с нулевым средним значением (в таком виде представляется информация о пульсациях параметра ЖРД в измерительном канале), то сглаженная выборочная оценка истинной спектральной плотности $\bar{S}_x(\omega)$ определяется зависимостью

$$\bar{S}_x(\omega) = 4 \int_0^{\tau_{max}} \bar{R}_x(\tau) D(\tau) \cos\omega\tau d\tau, \qquad (6.7)$$

где $\bar{R}_x(\tau)$ – корреляционная функция процесса; $D(\tau)$ – функция, характеризующая спектральное окно; τ_{max} – максимальная временная координата рассмотренной реализации $x(\tau)$; ω – частота пульсаций.

Численный аналог этой зависимости представляется в виде

$$\bar{S}_x(\omega_i) = \frac{4}{3} h(R_0 + \sum_{j=1}^{m-1} K \bar{R}_j D_j \cos\omega_i jh), \qquad (6.8)$$

где h – шаг дискретизации; $\omega_i = \omega_0 + \Delta\omega_i$; $i = 0, 1, 2, \ldots, m$; $\Delta\omega$ – шаг по частоте; $K = 4$ для нечетных и $K = 2$ для четных j; $\bar{R}_j$ – оценка корреляционной функции, которая определяется формулой

$$\bar{R}_j = \bar{R}_x(jh) = \frac{1}{N-j} \sum_{n=1}^{N-j} x_n x_{n+j}, \qquad j = 0,1,2,\ldots, m; \tag{6.9}$$

j – номер шага; m – максимальное число шагов; N – наибольшее значение ординаты дискретизации $x(\tau)$, рассматриваемой как совокупность $\{x_n\}(n = 1,2, \ldots, N$ со средним значением $x = 0$ и сдвигом jh).

Величина D_j представляет собой спектральное окно и определяется формулой

$$D_j = D(jh) = \begin{cases} \frac{1}{2}(1 + \cos \frac{\pi j}{m}) \text{ при } j = 0,1,2,\ldots,m; \\ 0 \text{ при } j > m. \end{cases}$$

Применение подобного подхода к сглаживанию позволяет получить удовлетворительные оценки спектральной плотности (по дисперсии к смещению оценки) с требуемой разрешающей способностью.

Расчету статистических характеристик случайного процесса предшествуют процедуры предварительной обработки данных (обнаружение и исключение выбросов, тренда, смещения нуля).

Особое значение в предотвращении искажений спектральной плотности играет устранение тренда составляющей процесса, период которой значительно отличается от типовых периодов колебаний. Решение этой задачи достигается применением высокочастотных цифровых фильтров либо методом наименьших квадратов. При этом ограничиваются обычно выделением тренда на базе полиномов не выше второй степени. Так,

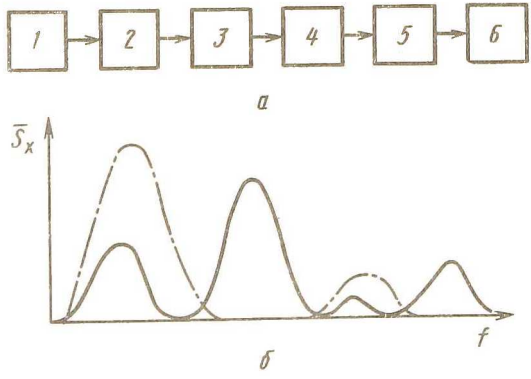


Рис. 6.10. Система акустического диагностирования: *а* **– схема: 1– ЖРД; 2 – преобразователь пульсаций давлений первичный; 3 – усилитель; 4 – фильтр; 5 – анализатор; 6 – блок сравнения;** *б* **– графики работы: – · – эталонный; —— при развитии неисправности**

для выбора функции, описывающей тренд $\bar{x}_j$ в виде квадратичной параболы, имеем

$$\bar{x}_j = \sum_{k=0}^{2} b_k (jh)^k, \qquad j = 1,2,\ldots m,$$

где m – число точек рассматриваемого временного интервала.

Коэффициенты b_k находятся исходя из условия $\min \sum_{j=1}^{m} (x_j - \bar{x}_j)^2$.

После определения полинома исключение тренда проводится согласно формуле

$$z_j = x_j - \bar{x}_j,$$

$$j = 1,2,\ldots m,$$

где z_j – новый временной ряд.

Для корректного использования расчетных зависимостей спектрального анализа, а также физической интерпретации результатов предварительно следует получить представление о нормальности и эргодичности исследуемого процесса. На практике принято считать, что пульсации параметров нормально функционирующего ЖРД обладают указанными свойствами. Однако в каждом конкретном случае проведения операций по диагностированию это допущение должно быть проверено.

Различных аппаратурных реализаций спектральных методов диагностирования технических средств систем разработано очень много – от специализированных устройств до унифицированных систем на базе ЭВМ.

На рис.6.10, *а* приведена одна из схем системы технического диагностирования, основанная на контроле автоспектральной плотности пульсаций давления $\bar{S}_x$ в магистрали ЖРД 1 с помощью первичного преобразователя пульсаций давления 2, усилителя 3 и фильтра 4. Анализатор 5 позволяет определить значение $\bar{S}_x$ на фиксированном интервале времени. Блок сравнения 6 ведет контроль за отклонением текущего значения $\bar{S}_x$ от эталонного и выдает сигнал о неисправности.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под автоматизацией испытаний ЖРД?
2. Какие задачи решают при автоматизации испытаний?
3. Приведите структурную схему автоматизированного испытания ЖРД.
4. Как обосновать необходимость применения ЭВМ при автоматизированном испытании?
5. Укажите особенности алгоритмов САЗ в автоматизированном испытательном комплексе.
6. Что такое интерфейс?
7. Каковы особенности интерфейса КАМАК?
8. Как решают задачи технического диагностирования ЖРД при автоматизированном испытании?

Глава 7
МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТНЫХ И СЕРИЙНЫХ ИСПЫТАНИЙ

7.1. ИМИТАЦИЯ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКЕ ЖРД

7.1.1. Принципы построения типовых КПЭО для определения основных параметров и характеристик ЖРД

Отработка ЖРД в опытном производстве осуществляется в соответствии с предварительно разработанной и утвержденной КПЭО. Она включает ряд частных типовых и специальных программ испытаний, реализация которых позволяет обеспечить заданные в ТЗ на разработку ЖРД энергетические, прочностные и эксплуатационные характеристики. Совокупность экспериментальных работ планируют таким образом, чтобы были оценены все важнейшие свойства и соответствующие им параметры, определяющие качество разрабатываемого ЖРД. К ним, в первую очередь, относятся:

энергетическое совершенство, под которым подразумевают уровни тяги, соотношение компонентов топлива, расходный комплекс, удельный импульс тяги и его воспроизводимость при повторных включениях;

прочность по отношению как к статическим, так и к динамическим нагрузкам;

охлаждаемость ЖРД, учитывающая как запас жаропрочности материала, так и запас термостойкости охлаждающего компонента топлива;

герметичность элементов ЖРД;

совершенство запуска;

качество гидравлических характеристик, которое оценивают по значениям давлений в камере сгорания, газогенераторе, за насосами, перепадом давлений на отдельных элементах ЖРД и т.п.;

управляемость ЖРД, которая может характеризоваться гарантийным запасом по управляющему сигналу;

антикавитационная способность, которую можно оценить по гарантийному кавитационному запасу;

устойчивость рабочего процесса по отношению к высокочастотным и низкочастотным колебаниям;

весовое совершенство, его характеризует удельная масса ЖРД;

надежность, которую можно оценить вероятностью безотказной работы или средней наработкой до отказа;

стабильность основных параметров.

Все предусмотренные КПЭО работы нужно выполнять на возможно меньшем числе ЖРД. Это обеспечивает сокращение затрат и времени на отработку ЖРД при максимальном насыщении КПЭО ЖРД утяжеленными режимами, в том числе при любых реальных сочетаниях внешних факторов.

Внешними факторами для ЖРД являются температуры и давления компонентов топлива на входах в насосы, которые в разных условиях эксплуатации, особенно при запуске, изменяются в довольно больших диапазонах, параметры продувочных газов, мощности пусковых устройств, положения регулирующих органов, атмосферные условия и т.д. Поскольку все множество возможных сочетаний внешних факторов в реальных условиях проверить нельзя, для подтверждения работоспособности ЖРД логично испытать его при наиболее неблагоприятных сочетаниях.

Такие сочетания находят применительно к параметрам ЖРД, определяющим его работоспособность. Обычно это давления и соотношения компонентов топлива в камере сгорания и газогенераторе, моменты воспламенения компонентов при запуске, время прихода компонентов в камеру сгорания и газогенератор, скорости нарастания давлений, тяга, частота вращения ротора ТНА, температура газа в газогенераторе и другие параметры, зависящие от особенностей конструкции конкретного ЖРД.

Значения действующих внешних факторов при заводских завершающих испытаниях назначают с допуском, выходящим за пределы эксплуатационного диапазона, что позволяет определить минимальные гарантийные запасы работоспособности. Примером неблагоприятного сочетания внешних факторов на запуске могут служить максимально замедленный и максимально ускоренный запуск по критерию достижения расчетного значения тяги – сочетания, приводящего к максимальной разновременности прихода компонентов топлива в газогенератор и камеру. При работе ЖРД на основном режиме это сочетание обусловливает максимальную температуру газов перед турбиной, максимальную частоту вращения ротора ТНА, предельное значение соотношения компонентов топлива, развитие кавитации в насосах и т.п. Естественно, успешное проведение испытаний в этих условиях дает гарантию работоспособности ЖРД при любых других условиях внутри области реализованных неблагоприятных сочетаний.

7.1.2. Имитация влияния внешних воздействий на ЖРД

В процессе доводки и наземной отработки ЖРД необходимо проверять надежность их работы в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным. Поэтому стенды для испытания ЖРД оборудуют системами, имитирующими влияние высотных и температурных условий, вибрационного нагружения и других факторов.

При изготовлении и отработке ЖРД особое место отводят автономным испытаниям на герметичность, прочность, вибрационную стойкость отдельных агрегатов. Однако при этом некоторые места, такие, как сварные швы, монтажные стыки, узлы крепления, остаются непроверенными. Контроль на прочность замкнутых объемов производят обычным методом гидроопрессовок, но для проверки прочности незамкнутых полостей, наружных подвесов, узлов, крепления агрегатов, средств монтажа необходимы испытания системы в целом на влияние различных перегрузок.

В зависимости от особенностей конструкции ЖРД могут быть подвергнуты испытаниям на влияние осевых и радиальных перегрузок. Для этого полностью собранный ЖРД крепят на центрифуге (рис.7.1). В соответствии с программой замкнутые полости могут находиться в нагруженном или разгруженном состоянии. Наиболее ответственные места конструкции оснащают телеметрическими первичными преобразователями, измеряющими местные напряжения, вибрации и другие параметры. Испытания такого рода дают информацию о прочности и жесткости крепления магистралей, различных агрегатов и приводов.

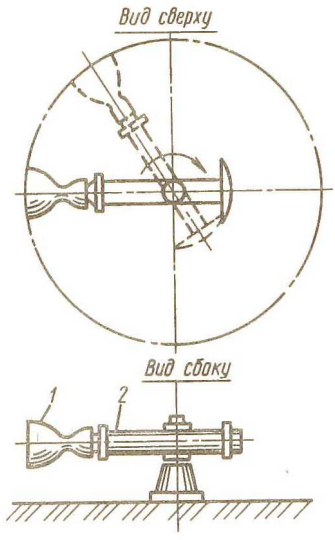


Рис.7.1. Схема установки ЖРД при испытании на центрифуге:
1 – ЖРД; 2 – центрифуга

Вибрационные испытания проводят с целью определения способности ЖРД противостоять воздействию вибрационных нагрузок. Для их проведения ЖРД оснащают вибро-тензопреобразователями, расположенными в наиболее ответственных местах, и устанавливают на вибростенд. В

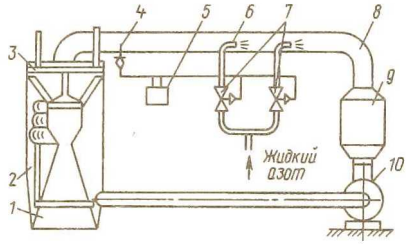


Рис.7.2. Схема замкнутой системы термостатирования ЖРД:
1 – сопло; 2 – чехол; 3 – рама; 4 – термопара; 5 – автомат-регулятор; 6 – форсунка; 7 – клапан; 8 – воздуховод; 9 – электрокалорифер; 10 – вентилятор

процессе испытания вибронагружения создают по двум осям в диапазоне 5...2000 Гц с амплитудами от 1 до 20 g в течение 2...10 мин, что позволяет выявить слабые места конструкции, возможные резонансные колебания.

Условия эксплуатации ЖРД характеризуются широким температурным диапазоном. Поэтому при стендовой отработке ЖРД необходимо проверять надежность его работы при различных температурах. С этой целью стенды оборудуют системами, обеспечивающими получение как положительных, так и отрицательных температур ЖРД, компонентов топлива и продувочных газов, т.е. на стендах создают специальные системы термостатирования.

Стендовая система термостатирования обеспечивает получение температур в диапазоне –50 ... +50 °С и выдержку ЖРД перед запуском при заданной температуре в течение необходимого времени. Работа системы основана на изоляции ЖРД от окружающей среды с помощью чехла и подачи в изолированный объем подогретого или охлажденного воздуха. Чехол изготовляют из плотной негорючей ткани с хорошими теплоизоляционными свойствами. Процесс термостатирования занимает 2...3 ч. Чехол 2 (рис.7.2) верхней частью закрепляется за раму 3 подвески ЖРД, а нижней частью охватывает сопло 1 около среза. Воздух в зону ЖРД подается по воздуховоду 8 с помощью центробежного вентилятора 10 с приводом от электродвигателя. Для контроля температурного режима ЖРД и температуры подводимого воздуха устанавливаются первичные преобразователи температуры. Рассматриваемая система замкнутого типа, т.е. воздух на вход в вентилятор поступает из пространства под чехлом. Это позволяет сократить время термостатирования, сэкономить электроэнергию и хладагент.

В процессе термостатирования ЖРД при отрицательных температурах охлаждение воздуха достигается впрыскиванием жидкого азота через форсунки. Контроль температуры воздуха осуществляется термопарой 4, которая совместно с автоматом-регулятором 5 и клапанами 7 в ли-

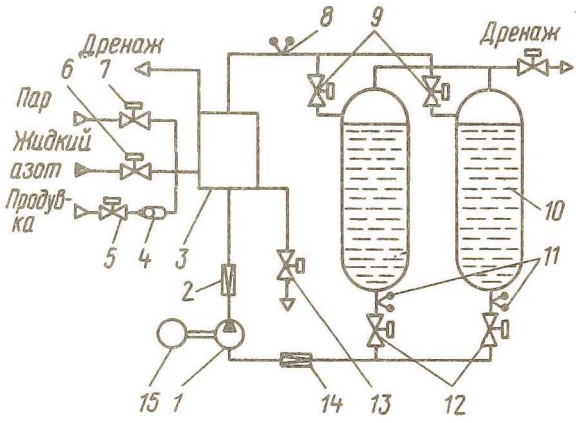


Рис.7.3. Схема термостатирования горючего: 1 — насос; 2, 14 — фильтры; 3 — теплообменник; 4 — клапан обратный; 5 — электропневмоклапан; 6, 7, 9, 12, 13 — пневмоклапаны; 8, 11 — термопары; 10 — емкость; 15 — электродвигатель

нии подвода жидкого азота к форсункам позволяет поддерживать температуру подаваемого воздуха в заданных пределах.

В процессе термостатирования ЖРД при положительных температурах воздух подогревается с помощью электрокалорифера 9, установленного за вентилятором 10. Термопара 4 через автомат-регулятор 5 включает и выключает электрокалорифер, поддерживая заданную температуру воздуха.

Для определения надежности запуска и проверки работы ЖРД на топливах с различными температурами испытательный стенд оборудуют системой термостатирования топлива. В качестве примера рассмотрим систему термостатирования керосина (рис.7.3). Система включает в себя расходные емкости 10 с горючим, теплообменник 3, арматуру и трубопроводы. В линии подвода горючего от емкостей к теплообменнику установлены фильтры 14 и 2. Емкости, арматуру и трубопроводы изолируют для уменьшения теплообмена с окружающей средой.

Для перекачки горючего через теплообменник применяют насос центробежного типа. Подачу насоса выбирают из условия обеспечения в трубопроводе системы термостатирования скорости течения примерно 2 м/с и не менее четырехкратного прохождения горючего из теплообменника в емкости в течение часа. Теплообменник предназначен для охлаждения или подогрева рабочей жидкости. Можно применять теплообменники различных типов, но все они должны обеспечивать надежное разделение полости горючего и полости тепло- и хладагента. Наиболее распространены трубчатые теплообменники с прокачкой горючего по трубкам и подачей тепло- и хладагента в межтрубное пространство. При установке теплообменника трубки должны быть расположены вертикально. Этим обеспечивается равномерность прокачки рабочей

жидкости по всем трубкам теплообменника и максимальный теплосъем. Горизонтальное расположение трубок резко снижает эффективность теплообменника и усложняет его эксплуатацию. Система продувок теплообменника предназначена для исключения образования в нем конденсата после термостатирования горючего при отрицательных температурах и для удаления конденсата после термостатирования при положительных температурах.

Отсечные пневмоклапаны 9 и 12 обеспечивают возможность раздельного термостатирования емкостей.

Горючее охлаждается жидким азотом, который подается в теплообменник через пневмоклапан 6. До подачи азота в теплообменник во избежание замораживания его в трубках должна осуществляться прокачка горючего насосом 1. При охлаждении горючего должны быть закрыты дренажные отверстия емкостей. В противном случае при охлаждении емкостей будет конденсироваться влага из атмосферного воздуха. В процессе термостатирования контролируется температура рабочей жидкости за теплообменником и в емкостях термопарами 8, 11. При достижении заданной температуры в емкостях закрывается пневмоклапан 6 подачи жидкого азота в теплообменник, открывается пневмоклапан 13 слива азота из теплообменника и включается продувка открытием электропневмоклапана 5. Прокачка горючего осуществляется еще некоторое время, после чего насос выключается и пневмоклапаны 9 и 12 закрываются.

Горючее нагревается горячим паром, подаваемым в теплообменник через пневмоклапан 7. Особенностью термостатирования при положительных температурах с помощью горючего пара является образование большого количества конденсата в теплообменнике при охлаждении пара. Для сброса конденсата пневмоклапан 13 в процессе термостатирования оставляют в открытом положении.

Так как нагретое горючее поступает в верхнюю часть емкости и не смешивается с находящимся там горючим вследствие меньшей плотности, то наблюдается температурное расслоение горючего по высоте. Поэтому при прокачке горючего в емкости в определенный момент происходит резкий скачок температуры. Во избежание перегрева необходимо поддерживать температуру горючего за теплообменником, измеряемую термопарой 8 не выше заданной.

По окончании термостатирования закрывается пневмоклапан 7, открытием электропневмоклапана 5 включается продувка теплообменника (4 – обратный клапан), затем выключается насос и закрываются пневмоклапаны 9 и 12.

Для проверки работоспособности ЖРД при различных температурах на стенде термостатируют баллоны со сжатым газом, предназначенным для продувки в интервале +100...–100 °С. Термостатируемые баллоны заключают в кожух, в который подается горячий пар или жидкий азот. При термостатировании баллоны нужно располагать горизонтально, чтобы исключить возможность температурного расслоения газа по высоте. Температура газа контролируется по вмонтированным в баллон первичным преобразователям. При термостатировании необходимо учитывать изменение давления в баллонах в зависимости от изменения температуры.

Следовательно, в процессе термостатирования при отрицательных температурах необходимо дозаправлять баллоны до заданного давления, а при положительных температурах исключать возможность возрастания давления выше допустимого для них.

7.1.3. Имитация газонасыщения компонентов топлива

Топливо в той или иной мере может растворять газ, используемый для наддува топливных баков ракеты. Растворимость газа в жидком топливе подчиняется закону Генри, согласно которому растворимость газа прямо пропорциональна его парциальному давлению над жидкостью:

$$C = kp, \qquad (7.1)$$

где C – концентрация газа в жидкости; p – давление газа; k – коэффициент растворимости Генри, при низких давлениях являющийся функцией температуры жидкости.

Растворение газа в топливе оказывает существенное влияние на давление в топливных баках, особенно при эксплуатации долгохранимых ракет, а также на кавитационные характеристики магистралей питания и насосов ЖРД.

Для проверки влияния насыщения (адсорбции) топлив газами на эксплуатационные характеристики ракетных систем стендовые испытания ЖРД проводят с газонасыщением компонентов топлива.

Система насыщения топлива газом включает шину 1 (рис.7.4), изготовленную из трубки и опущенную в стендовый бак 3 с топливом. Нижняя часть шины загнута в виде кольца и имеет множество отверстий для выхода газа. В линии подвода газа установлены редуктор 5, манометр 6 и запорный клапан 7.

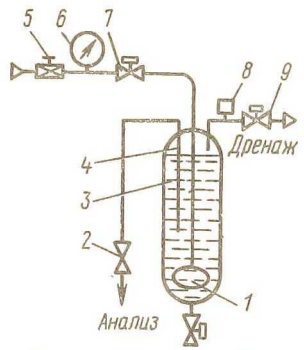


Рис.7.4. Схема системы насыщения топлива газом:
1 – шина; 2 – вентиль; 3 – бак стендовый; 4 – система отбора; 5 – редуктор; 6 – манометр; 7 – клапан запорный; 8 – преобразователь-сигнализатор; 9 – пневмоклапан дренажный

Для насыщения используют газ, применяемый для наддува баков ракеты. Процесс насыщения осуществляется методом барботирования и проходит в следующем порядке. Открывается клапан 7 и газ подается в шину. Дренажный пневмоклапан 9 при этом закрыт. Выходящий из отверстий шины газ поднимается вверх, частично растворяясь в топливе, а оставшаяся часть скапливается в газовой подушке бака. Постепенно давление в газовой подушке возрастает до уровня давления настройки преобразователя-сигнализатора 8. При заданном давлении контакты первичного преобразователя замыкаются и выдается команда на открытие дренажного пневмоклапана 9 и сброс избыточного давления из газовой подушки бака. Таким образом поддерживается постоянное заданное давление в газовой подушке. С момента достижения заданного давления начинается отсчет времени процесса растворения газа в топливе. Насыщение ведется в течение определенного времени, после чего закрывается запорный клапан 7 и в газовой подушке создается давление выше того, при котором велось насыщение. Это исключает уменьшение насыщения (десорбцию).

У таких компонентов, как керосин, через систему отбора 4 из середины бака берется контрольная проба для определения насыщения. Проба берется через вентиль 2 в спецприбор.

Принцип работы спецприбора основан на десорбции газа из пробы в замкнутом объеме при атмосферном давлении. Объем выделившегося газа измеряется и пересчитывается на нормальные атмосферные условия. Насыщение $a_{нас}$ топлива в баке в процентах определяется по формуле

$$a_{нас} = (a' + a), \qquad (7.2)$$

где a' – объем не выделившегося газа из пробы топлива в спецприборе, определяемый по справочным данным для атмосферного давления и температуры в момент анализа, %; a – насыщение, определенное по спецприбору, %.

7.1.4. Имитация невесомости

Довольно сложно при имитации условий эксплуатации обеспечить невесомость, необходимую для испытания ЖРД верхних ступеней ракет, вступающих в работу именно в этих условиях или в условиях, близких к нулю осевых перегрузок. Реально воссоздать физическую картину изменения состояния компонентов топлива при наличии невесомости в земных условиях непросто. Эту задачу можно решить, имитируя работу ДУ в полете и используя для этого так называемые башни невесомости, которые представляют собой полые, вертикально расположенные высотные сооружения. Внутри такой башни имеются направляющие, обеспечивающие свободное или принудительное перемещение платформы (подобное перемещению кабины лифта высотного дома). На платформе устанавливают ДУ так, чтобы вектор тяги от работающего ЖРД был направлен вертикально вверх.

Подготовленную для испытания ДУ устанавливают на верхнем ярусе башни. Затем в нужный момент она вместе с платформой может совершить свободное падение вдоль направляющих под действием силы тяжести.

При включении ЖРД по команде с пульта управления возникает тяга, которая противодействует силе тяжести. Если тяга превышает силу тяжести платформы с ДУ, то происходит полное торможение платформы. В момент остановки платформа автоматически с помощью специальных захватов фиксируется относительно направляющих, после чего ЖРД выключается.

Башни невесомости – это дорогостоящие и уникальные сооружения. Имитация невесомости может быть достигнута при сбрасывании контейнера с ДУ с самолета. После запуска и выключения ЖРД контейнер спускается на землю с помощью парашютных систем.

В обоих примерах платформа с ДУ и контейнер обеспечиваются системами телеконтроля в виде автономных записывающих устройств и передатчиков. Кроме параметров ДУ фиксируются также осевые перегрузки в течение всего испытания, начиная с момента свободного падения до выключения ЖРД.

7.2. МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО СООТВЕТСТВИЯ СТЕНДОВЫХ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ РАКЕТНЫМ

Динамические процессы, возникающие в топливных магистралях подачи компонентов, зависят от многих факторов, определяемых свойствами компонентов топлива, пневмосхемой и циклограммой работы ЖРД, конструкцией и характеристиками трубопроводных схем питания ЖРД из расходных емкостей. Известно, что характер динамических процессов в магистралях оказывает существенное влияние на параметры ЖРД. Значит, для правильного определения характеристик во время испытаний необходимо обеспечить соответствие динамических процессов, возникающих в стендовых магистралях, процессам, возникающим в магистралях, подводящих топливо к ЖРД в ракете. Это достигается идентичностью конструктивного выполнения системы подачи компонентов к ЖРД на стенде и в ракете. Последнее обстоятельство, как правило, вызывает значительные технические трудности, связанные с особенностями построения стендовых топливных коммуникаций, которые определяются:

универсальностью наземных огневых стендов, т.е. возможностью испытаний на них различных типов ЖРД;

необходимостью обеспечения высокой степени безопасности при стендовых испытаниях, что требует достаточного удаления расходных емкостей от бокса, надежной изоляции друг от друга линий подачи горючего и окислителя, увеличения прочности конструкции трубопроводов;

возможностью реализации на стенде различных программ испытаний, что связано с установкой в топливные магистрали дополнительной арматуры (клапанов, дроссельных устройств, измеряющих устройств).

Отмеченные особенности обусловливают необходимость применения на стендах довольно протяженных толстостенных трубопроводов, по своей конструкции и характеристикам значительно отличающихся от трубопроводов систем подачи компонентов из баков к ЖРД на ракете. Этим объясняются значительные отличия в параметрах динамических процессов в системе подачи при стендовой отработке ЖРД и при эксплуатации ЖРД на ракете (рис.7.5). Как видно из приведенных графиков, процессы различаются по частоте, экстремальным отклонениям давлений, декрементам колебаний.

Все эти факторы, безусловно, сказываются и на основных свойствах ЖРД – характере нарастания тяги, кавитационных свойствах насо-

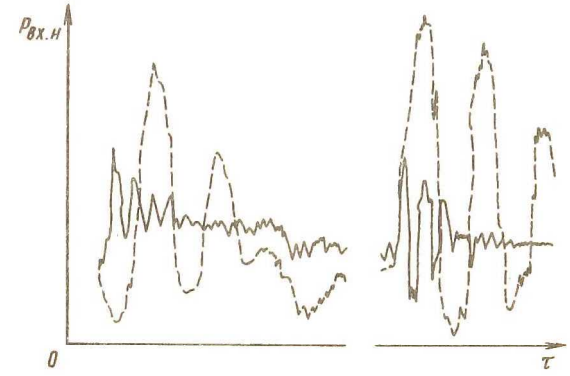


Рис. 7.5. Графики изменения давления на входе в насос топливной системы при запуске и останове ЖРД на стенде (– – – –) и на ракете (——)

сов, устойчивости рабочего процесса. В связи с этим обеспечение динамического подобия топливных систем стенда и ракеты является одним из основных этапов в решении задачи приближения условий наземных испытаний к условиям эксплуатации ЖРД на ракете.

Из анализа уравнений движения жидкости в цилиндрическом трубопроводе следует, что гидродинамическое подобие достигается при равенстве чисел Струхаля $Sh = \omega l/c$ и Маха $M = c/a$, безразмерных волновых сопротивлений $\rho ca/p$ и относительных потерь на трение $\Delta p/p$. Здесь ω – частота колебаний; c – скорость движения компонента топлива; a – приведенная скорость звука в системе трубопровод – жидкость; l – характерная длина.

Кроме того, необходимо обеспечение геометрического подобия гидравлических трактов и граничных условий на концах трубопровода. В связи с небольшими скоростями движения компонентов топлива в трубопроводах влиянием числа M можно пренебречь. Ввиду того что обеспечение условия равенства частот свободных колебаний в трубопроводах стенда и ракеты $\omega_{ст} = \omega_{р}$ бесспорно возможно, получим исходя из требований критериальных равенств уравнения динамического подобия

$$l_{ст}/c_{ст} = l_{р}/c_{р} \qquad \text{или} \qquad l_{ст}F_{ст} = l_{р}F_{р},$$

где F – площадь сечения трубопровода; индексами ст и р обозначены параметры стенда и ракеты.

Кроме того, так как расход компонента топлива на стенде и ракете одинаков, то

$$\rho c_{ст} a_{ст}/p_{ст} = \rho c_{р} a_{р}/p_{р} \quad \text{или} \quad a_{ст}/F_{ст} = a_{р}/F_{р}. \qquad (7.3)$$

Кроме того, так как плотность, расход и давление также идентичны, то

$$\Delta p_{\Sigma ст}/p_{ст} = \Delta p_{\Sigma р}/p_{р},$$

где $\Delta p_{\Sigma ст}$, $\Delta p_{\Sigma р}$ – потери на трение. При минимальных конструктивных изменениях в стендовой топливной системе решение задачи может быть получено установкой в сечении трубопровода на длине $l = l_{р}$ разделительных проточных или непроточной емкостей. Трубопровод ракеты должен быть выполнен геометрически подобным объектовому, из того же материала, с той же толщиной стенки. Это обеспечивает равенство скоростей звука $a_{ст} = a_{р}$. На длине $l_{р}$ должно быть выполнено и условие равенства потерь на трение $\Delta p_{\Sigma ст} = \Delta p_{\Sigma р}$.

При работе с разделительной проточной емкостью 2 (рис.7.6, *а*), клапан 4 при запуске должен быть закрыт, трубопроводы ракеты 1 и стенда 6 заполнены компонентом топлива. Давление в газовой подушке, обеспечиваемое системой наддува, устанавливается из расчета условий запуска, давление наддува емкости 5 соответствует давлению на основном режиме. Схема обеспечивает длительный режим имитации. Схема с непроточной емкостью (рис.7.6, *б*) более универсальна, так как позволяет отключать емкость 2 с помощью клапана 7.

Циклограмма работы системы управления должна обеспечить заданную программу срабатывания управляющих кла-

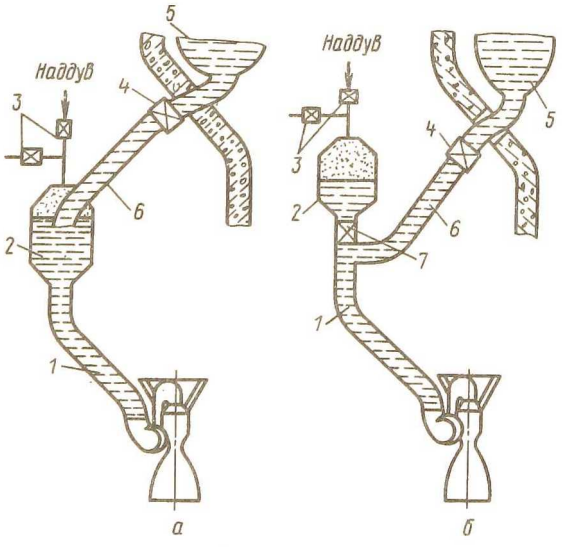


Рис.7.6. Разделительные проточная (*а*) и непроточная (*б*) емкости: 1, 6 – трубопроводы ракеты и стенда; 2, 5 – емкости; 3, 4 – клапана

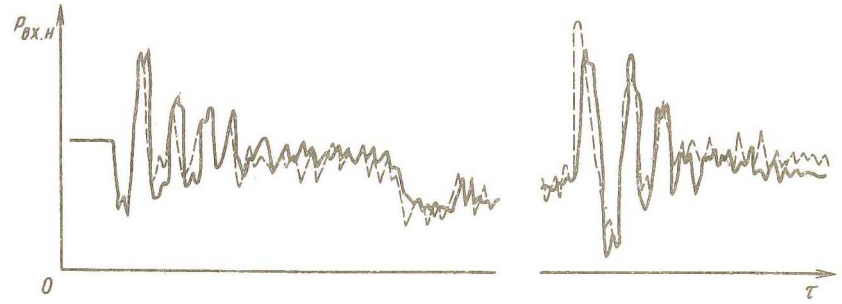


Рис.7.7. Осциллограммы изменения давления на входе в насос при запуске и останове ЖРД при стендовых испытаниях с разделительной емкостью (– – – –) и при работе на ракете (——)

панов для получения определенного режима изменения давления на входе в насосы ЖРД с сохранением уровня компонента топлива в разделительной емкости в заданных пределах.

Уменьшение объема газовой подушки может привести к нарушению имитации граничного условия $\delta p_б = 0$, где $p_б$ – давление в баке, в начале участка трубопровода ракеты, увеличение – к попаданию газа на вход в насос и затем – к кавитационному срыву.

Включение в трубопровод подачи компонента топлива емкости может привести к возникновению в системе подачи низкочастотных колебаний, не свойственных условиям эксплуатации. Для предотвращения таких явлений системы подачи с разделительными емкостями подвергают предварительному динамическому анализу. Результаты такого анализа показали, что акустическая индуктивность, гидравлическое сопротивление и податливость системы подачи полностью определяют характер переходных процессов в них и при соответствующих соотношениях между указанными параметрами можно добиться желаемого динамического качества.

Метод использования разделительной емкости показал свою высокую эффективность для решения задачи обеспечения динамического соответствия стендовых и ракетных топливных систем. На осциллограммах изменения давления на входе в насос ЖРД, полученных при стендовых испытаниях (с разделительной емкостью) и при работе на ракете (рис.7.7), видно, что используя приемы обеспечения динамического соответствия, можно при стендовых испытаниях обеспечить частоту свободных колебаний, декременты колебаний и экстремальные отклонения давлений, идентичные этим параметрам на ракете.

7.3. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ДУ

Особенности процессов, протекающих в ДУ при функционировании ее в ракете, требуют тщательного изучения динамических взаимодействий ЖРД с системами, оказывающими влияние на его параметры, на устойчивость рабочих процессов в его узлах, на динамическую устойчивость силовой схемы системы ЖРД – ракета.

На формирование выходного параметра ЖРД – тяги или его аналога – давления в камере сгорания оказывают влияние динамические возмущения со стороны магистралей окислителя и горючего, а также со стороны регулятора кажущейся скорости. Возмущения по каналу системы опорожнения баков, обычно медленнодействующие, не оказывают сильного влияния на характер изменения тяги по времени.

Интерес представляет и исследование динамических свойств силового канала связи между тягой и деформацией силовой схемы ракетной ступени, так как проявление в этом канале, например, резонансных свойств может уменьшить запас динамической прочности конструкции или привести к потере устойчивости силовой схемы.

Схема взаимодействия ЖРД с системами ракеты представлена на рис.7.8. Задача определения чувствительности ЖРД к возмущениям по различным каналам этой схемы, получения необходимых характеристик связи возмущений с реакцией ЖРД на них решается проведением специальных динамических испытаний (пульсационно-частотных и вибрационно-частотных).

Из-за некоторых специфических требований по обеспечению надежности расширяется программа этих испытаний по проверке устойчивости рабочих процессов в энергетических узлах ЖРД (камере сгорания, газогенераторе и т.п.), а также по оценке эффективности САЗ. Так как при таких испытаниях необходим тщательный анализ динамических процессов, происходящих в различных узлах и магистралях ДУ, кото-

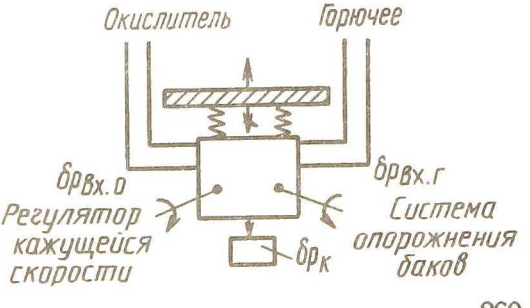


Рис.7.8. Схема взаимодействия ЖРД с системами ракеты

рый можно выполнить, используя специальную систему измерений, то условно их можно отнести к классу специальных динамических испытаний.

Испытания по таким программам, как правило, проводят на окончательной стадии создания ЖРД или при проверке версии в процессе разбора аномалий, отмеченных в летной эксплуатации.

7.3.1. Пульсационно-частотные испытания

При пульсационно-частотном испытании в ДУ вносят возмущения, вызывающие периодическое изменение параметров вблизи их установившихся значений с определенной амплитудой и в интересующем частотном диапазоне. В зависимости от поставленной цели пульсационные испытания подразделяют на два типа:

испытания для получения экспериментальных частотных характеристик ЖРД и его отдельных агрегатов;

испытания для проверки запасов устойчивости рабочих процессов в энергетических узлах ДУ.

Пульсационные частотные испытания первого типа проводят обычно в диапазоне частот от 0 до 50 Гц с заданием возмущений по каналу управления режимом работы ЖРД при использовании регулятора режима или по каналу продольных колебаний, т.е. с заданием возмущений на входах в насосы ТНА.

В результате обработки полученной информации об изменении параметров ЖРД могут быть определены экспериментальные частотные характеристики, оценивающие его свойства:

как исполнительного органа системы управления, т.е. получают частотную характеристику, связывающую приращение давления в камере сгорания с приращением сигнала на изменение положения дозирующего элемента регулятора режима;

как звена в контуре продольных колебаний, т.е. получают частотные характеристики, связывающие приращение давления в камере сгорания с приращениями давлений окислителя и горючего на входе в насосы ЖРД.

Задание периодических возмущений возможно по схемам, приведенным на рис.7.9 и 7.10. В первой схеме возмущающий сигнал пульсатора задатчика колебаний эквивалентен изменению площади проходного сечения дроссельного крана регулятора тяги, задаваемому углом его поворота φ, в связи с чем иногда, особенно при низких частотах возмущений, можно использовать в качестве пульсаторов рулевой при-

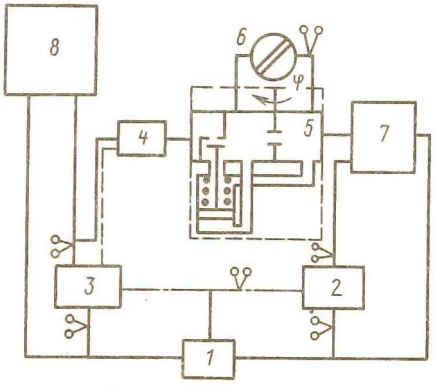


Рис.7.9. Структурная схема частотных испытаний с заданием возмущений по каналу управления:
1 – турбина; 2 – насос окислителя; 3 – насос горючего; 4 – насос дополнительный; 5 – регулятор тяги; 6 – пульсатор; 7 – газогенератор; 8 – камера сгорания

вод системы управления – рулевую машину. Во второй схеме возмущение реализуется путем периодического слива части компонента топлива из расходной питающей магистрали.

В качестве пульсаторов применяют золотниковые дроссельные устройства или генераторы типа сирен. С помощью таких пульсаторов можно создавать возмущения по расходу от нескольких граммов до десятков килограммов в секунду на частотах от нескольких десятых долей герца до нескольких килогерц.

Высокочастотные генераторы применяют при испытаниях, проводимых для определения запаса устойчивости рабочих процессов в газогенераторах и камерах сгорания. Частотные испытания с заданием возмущений по каналам управления и продольных колебаний проводят на различных режимах работы ЖРД, что позволяет определить возможный разброс динамических характеристик в зависимости от влияния переменных внешних факторов (изменения давлений компонентов топлива на входе в насосы, режима и т.п.).

Пульсационно-частотные испытания можно провести для определения динамических характеристик отдельных трактов ЖРД, что особенно важно для уточнения математической модели его динамики, а также для определения динамических

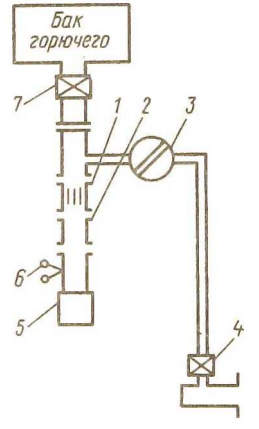


Рис.7.10. Схема частотных испытаний с заданием возмущений на входе в ЖРД:
1, 2 – расходомеры; 3 – пульсатор; 4 – клапан слива; 5 – насос ЖРД; 6 – преобразователь давления первичный; 7 – клапан расходный

свойств автономных агрегатов: насосов, регуляторов, расходных трубопроводов, элементов системы измерения. Определение этих характеристик возможно как при пульсационно-частотных испытаниях всего ЖРД, так и при проведении автономных испытаний отдельных узлов.

При проведении пульсационно-частотных испытаний следует особое внимание уделять динамической аттестации применяемой системы измерений для исключения значительных погрешностей. В системе должна быть предусмотрена возможность автоматизированной обработки полученной информации в связи с довольно большим объемом вычислений при гармоническом анализе экспонированных периодических сигналов. Для удовлетворения требований к первичной информации, получаемой в результате пульсационно-частотных испытаний, рекомендуется применять разветвленные системы регистрации и обработки. Это позволяет вести одновременно регистрацию как на шлейфовый осциллограф, так и на магнитные регистраторы. При этом наряду с наглядностью получаемой информации реализуется возможность автоматизации обработки.

Пульсационно-частотные испытания второго типа (в высокочастотной области) проводят для оценки степени устойчивости рабочих процессов в камере сгорания или газогенераторе ЖРД. Возмущения задают по трубопроводу подачи компонентов топлива в эти узлы в диапазоне частот, характерных для того или иного типа неустойчивости горения. Проведение таких испытаний позволяет также раскрыть физические особенности проявления неустойчивости рабочего процесса, выработать конструктивные и параметрические мероприятия, предотвращающие возникновение этого нежелательного явления, а также оценить эффективность проведенных мероприятий.

Диапазон частот, генерируемых пульсаторами, составляет при таких испытаниях 50 Гц и выше. При проведении пульсационных частотных испытаний с заданием возмущений по трубопроводу подачи горючего в газогенератор возмущение системы производится периодически сливом горючего из трубопровода питания газогенератора 7 (рис.7.11) через пульсатор 3. При этом измеряются пульсации давления в трубопроводе и газогенераторе.

Часто при проведении таких испытаний кроме качественных оценок степени чувствительности рабочего процесса в энергетическом узле к возбуждению со стороны трубопроводов подачи компонентов топлива получают частотные характеристики отдельных контуров ЖРД. Это позволяет решать задачи синтеза гасителей колебаний в трубопроводах

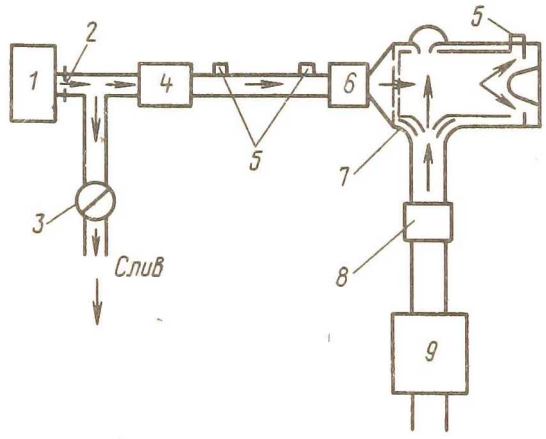


Рис. 7.11. Схема пульсационно-частотных испытаний газогенератора: 1 – насос горючего; 2 – шайба настроечная; 3 – пульсатор; 4 – регулятор режима; 5 – преобразователь пульсаций первичный; 6 – клапан горючего; 7 – газогенератор; 8 – клапан окислителя; 9 – насос окислителя

подачи топлива и т.п. Безусловно, при этом необходимо обеспечить высокую разрешающую способность применяемой системы измерений. Она должна иметь высокую динамическую точность в высокочастотной области.

К рассмотренному типу испытаний для оценки устойчивости рабочих процессов в энергетических узлах ЖРД относятся испытания для оценки запасов устойчивости путем импульсного динамического возбуждения.

Для импульсного возбуждения можно использовать устройства двух типов – внутрикамерное возмущающее устройство и внешнее импульсное устройство.

С помощью внутрикамерного возмущающего устройства малые навески взрывчатого вещества подрываются в заданном месте испытуемого узла во время работы ЖРД. После этого оценивается реакция рабочего процесса на внесенное возмущение по результатам измерения пульсации давления в узле. При этом в качестве критерия оценки может быть использован декремент затухания колебаний, время затухания или другие параметры процесса.

В зависимости от конструкции внутрикамерного возмущающего устройства и его расположения в энергетическом узле масса взрывчатого вещества может изменяться от долей грамма до нескольких десятков граммов.

Изменяя величину импульса при срабатывании внутрикамерного возмущающего устройства или внешнего импульсного устройства, можно судить о пороге чувствительности процесса при жестком возбуждении автоколебаний в газогенераторе или камере сгорания.

7.3.2. Вибрационно-частотные испытания

Большое значение в практике доводки ЖРД имеют испытания, при которых производится силовое возбуждение его конструкции.

Во-первых, это связано с необходимостью определения частот и форм колебаний самой конструкции ЖРД как механической системы. Как известно, при работе ЖРД генерируются вибрационные нагрузки широкого спектрального состава и значительной интенсивности. Для обеспечения надежности ЖРД и агрегатов, установленных на нем, важно знать "вибрационный портрет" его конструкции и эффективность мероприятий по снижению интенсивности вибраций.

Во-вторых, как видно из структуры динамических взаимодействий ЖРД с ракетой (см. рис.7.8), важно определить взаимное силовое влияние их друг на друга в процессе работы.

ЖРД является источником тяги, которая через систему подвески передается на корпус ракеты. Так как жесткость подвески не бесконечно велика, система ЖРД – подвеска образует осциллирующий контур. Кроме того, эти колебания оказывают влияние на форму и частоту собственных колебаний корпуса ракеты. Так как тяга, развиваемая ЖРД даже на установившемся режиме, характеризуется определенным частотным спектром , в механической системе подвески ЖРД к силовым элементам корпуса ракеты могут развиваться резонансные явления, снижающие запас устойчивости комплекса ЖРД – ракета и приводящие к дополнительным силовым нагрузкам на элементы конструкции ракеты.

Дополнительные динамические силовые нагрузки могут воздействовать и на ЖРД со стороны ракеты, например при резком изменении осевой перегрузки при отключении ДУ ступени, при разделении ступеней и т.д. Отсюда возникает задача имитации подобных вибрационных нагрузок при наземной отработке ЖРД.

Все перечисленные задачи исследования силового состояния и вибрационных динамических характеристик решаются путем проведения модельных и огневых вибрационных испытаний в широком диапазоне частот и амплитуд возмущений. Для возбуждения применяют электродинамические, электрогидравлические, инерционные или пружинно-эксцентриковые вибраторы.

Иногда программы вибрационно-частотных испытаний ЖРД совмещают с испытаниями моделей, или натурных ракет, или их отдельных ступеней. На рис.7.12 показана структурная схема вибрационно-частотных испытаний ракеты-носителя "Сатурн-5". При проведении таких испытаний используется специальный измерительно-вычис-

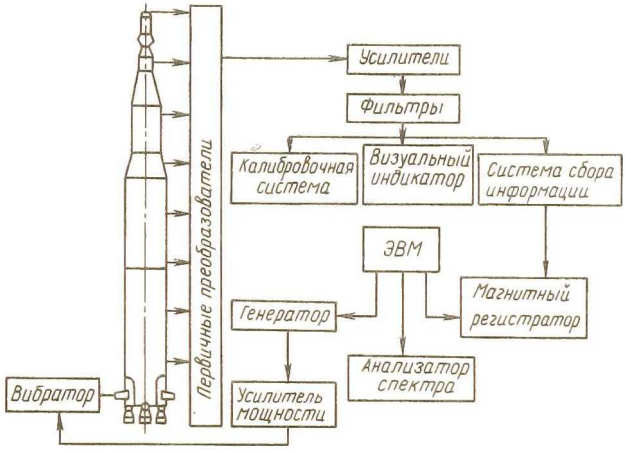


Рис. 7.12. Структурная схема вибрационно-частотных испытаний ракеты-носителя "Сатурн-5"

лительный комплекс, позволяющий автоматизировать обработку получаемой информации.

Кроме определения коэффициентов запаса динамической прочности, степени виброустойчивости конструкции, частотных характеристик ЖРД как механической системы с распределенными массой и жесткостью вибрационно-частотные испытания позволяют определить пути коррекции динамических характеристик системы ЖРД – ракета, оценить эффективность внедряемых мероприятий по ее виброзащите и частотной отстройке.

7.3.3. Динамические испытания САЗ

Особое место в программе специальных динамических испытаний ЖРД занимают проверки эффективности САЗ, а также исследования, направленные на ее совершенствование – повышение чувствительности и быстродействия. Назначение САЗ, которая может быть использована при стендовых испытаниях ЖРД и при его работе в ракете, – это контроль текущего состояния ЖРД, обнаружение развивающейся неисправности и формирование регулирующего или управляющего воздействия для предотвращения аварии. В большинстве случаев САЗ вырабатывает управляющий сигнал на выключение ЖРД, это связано с довольно высокой скоростью развития возможных неисправностей в нем.

Создание надежных эффективных САЗ особенно важно при доводке и эксплуатации сложных и дорогостоящих ракетно-космических систем, так как даже незначительная неконтролируемая неисправность в них может привести к значительным разрушениям стендового оборудования или самого объекта испытания и, следовательно, к большим материальным потерям. Поэтому очень важно контролировать состояние двигателя и принимать своевременные меры по предотвращению аварии или локализации неисправности. Как правило, опыт доводки и эксплуатации ЖРД позволяет практически из бесконечного числа возможных аварийных состояний выбрать основные, наиболее тяжелые и наиболее вероятные. К ним можно отнести нарушение герметичности жидкостных и газовых магистралей ЖРД, неисправность элементов автоматики и управления, кавитационный срыв насосов ТНА, развитие неустойчивости рабочего процесса в газогенераторе или камере сгорания. Разработанные структуры САЗ, включающие первичные преобразователи для измерения контролируемых параметров, вторичную аппаратуру и блоки выработки воздействия на органы регулирования и управления ЖРД, должны быть подвергнуты аттестационным испытаниям, по результатам которых оценивается эффективность САЗ.

Таким образом, при проверке САЗ проводят программу имитационных динамических испытаний, моделирующих основные неисправности ЖРД: разгерметизацию магистралей, кавитационный срыв насосов, неустойчивость горения и т.п. Часто эти испытания совмещают с пульсационно-частотными испытаниями, так как при их проведении ЖРД оборудуют специальной, высокоточной системой измерения динамических параметров. После окончания программы пульсационно-частотных испытаний имитируют аварию путем намеренного разрушения магистрали, сброса давления наддува, возбуждения колебаний в камере сгорания или газогенераторе. Контроль своевременного срабатывания САЗ ведут по результатам полученных измерений.

7.4. ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ НАДЕЖНОСТИ ЖРД В УСЛОВИЯХ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Организация и объем контрольных испытаний в серийном производстве существенно зависят от особенностей конструкции, схемы и назначения ЖРД. Как было отмечено в гл.1, основными видами серийных испытаний являются контрольно-технологические, подтверждающие периодические (контрольно-выборочные) испытания. Рассмотрим подтверждающие периодические (контрольно-выборочные) испытания как метод

оценки надежности ЖРД, стабильности технологических процессов его изготовления и сборки.

ЖРД на серийном заводе изготовляют партиями, объем которых зависит от их назначения и тяги. От определенной партии изготовленных ЖРД отбирают некоторое число экземпляров, которые подвергают испытаниям на полный стендовый ресурс. Для получения гарантийного запаса время стендового ресурса устанавливают с превышением над временем работы ЖРД в ракете.

Так же как стабильность отдельной технологической операции контролируют по изменению размера детали путем вычисления, например, математического ожидания и среднеквадратического отклонения, стабильность процесса изготовления ЖРД контролируют по результатам подтверждающих периодических (контрольно-выборочных) испытаний путем оценки отклонений его основных параметров и характеристик. Помимо ТУ выбор параметров для контроля, а также построение программы подтверждающих периодических (контрольно-выборочных) испытаний зависят от тяги, особенностей эксплуатации и конструкции ЖРД.

Программа подтверждающих периодических (контрольно-выборочных) испытаний должна включать следующие разделы:

огневое испытание (ТУ и задание на проведение испытания);

разборка и дефектация элементов ЖРД;

правило оценки результатов подтверждающих периодических (контрольно-выборочных) испытаний, разработанное на основе нормативно-технической документации.

Рассмотрим в качестве примера основные работы, связанные с проведением подтверждающих периодических (контрольно-выборочных) испытаний ЖРД средней тяги.

В задании на огневое испытание отобранного от партии ЖРД указывают внешние для данного испытания факторы (температуры, давления компонентов топлива и др.). Последние задают с таким расчетом, чтобы ЖРД был проверен во всем диапазоне изменения внешних факторов (рис.7.13). Проверку можно производить на нескольких ЖРД, если отсутствует возможность изменять эти факторы в процессе подтверждающих периодических (контрольно-выборочных) испытаний. Заметим,

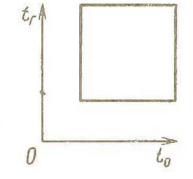


Рис.7.13. Область испытания ЖРД при различных значениях температур компонентов топлива

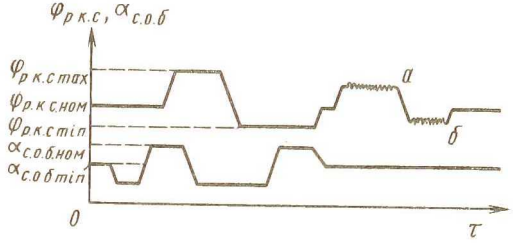


Рис.7.14. Программа изменения положения регулирующих органов

что подтверждающее периодическое (контрольно-выборочное) испытание может включать несколько огневых испытаний, если для данного ЖРД предусмотрен многократный запуск.

Программу изменения углов поворота регулятора кажущейся скорости $\varphi_{р.к.с}$ и дроссельного крана системы опорожнения баков $\alpha_{с.о.б}$ (рис.7.14) составляют таким образом, чтобы ЖРД работал во всех характерных точках так называемого рабочего квадрата (рис.7.15). Рабочий квадрат – область различных сочетаний варьируемых параметров, в рассматриваемом случае $\varphi_{р.к.с}$ и $\alpha_{с.о.б}$. В характерных точках рабочего квадрата следует давать выдержку постоянных режимов, чтобы выполнить точные измерения параметров ЖРД для последующей достоверной оценки характеристик. На площадках *а* и *б* (см. рис.7.15; 7.14) работа ЖРД проверяется при различных положениях регулятора. Суммарное время работы на тех или иных режимах должно примерно соответствовать эксплуатационной программе работы ЖРД. В начале и в конце испытания должны быть предусмотрены выдержки на номинальном режиме, на который ЖРД настраивают для оценки изменения характеристик в течение срока службы. Этот режим соответствует сочетанию номинальных $\varphi_{р.к.с}$ и $\alpha_{с.о.б}$, т.е. работе в точке *о* (см. рис.7.15).

После того как в соответствии с программой будет выполнен весь комплекс огневых испытаний, ЖРД подвергают разборке и дефекта-

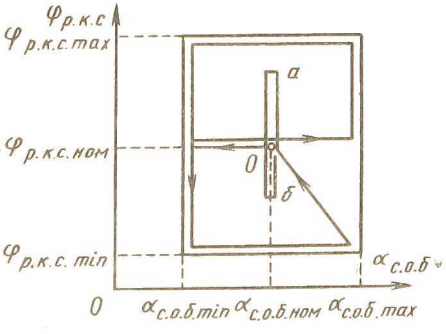


Рис.7.15. Траектория изменения значений $\varphi_{р.к.с}$ и $\alpha_{с.о.б}$, соответствующая программе, приведенной на рис.7.14

ции, при которой определяют состояние его элементов, износ деталей и их соответствие ТУ. Одновременно обрабатывают результаты измерений и оценивают все регламентированные статические и динамические характеристики ЖРД. Если все характеристики ЖРД и его элементов находятся в допустимых пределах, надежность партии ЖРД считается подтвержденной. ЖРД этой партии можно устанавливать на ракеты.

Однако анализ результатов испытаний на этом не заканчивают. Результаты данного испытания сравнивают с результатами предыдущих испытаний для обнаружения тенденций в отклонениях параметров (в пределах ТУ) или систематических отклонений. Это дает возможность прогнозировать отклонения, выяснять их причины и проводить на производстве мероприятия, исключающие в дальнейшем увеличение отклонений и выход их за допустимые пределы. Примером мероприятий могут служить изменение сроков регламентных работ для оборудования завода, ужесточение контроля, специальное наблюдение за особо важными операциями.

7.5. ТЕХНОЛОГИЯ ИСПЫТАНИЙ ЖРД В СЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

7.5.1. Техническая документация, применяемая при испытаниях

Одним из основных условий успешного проведения испытания является наличие тщательно разработанной технической документации — конструкторской и технологической.

Основным конструкторским документом являются ТУ на испытания, содержащие все требования к испытаниям ЖРД в серийном производстве.

В ТУ приводят:

требования к работам, проводимым на ЖРД до его монтажа на стенд;

требования к монтажу ЖРД на стенде;

параметры компонентов топлива и продувок;

циклограмму запуска, работы на режимах и останова ЖРД;

параметры, по которым производится защита ЖРД, и вид защиты;

параметры, измеряемые при испытании;

требования к измерительной аппаратуре и методике измерений;

требования к работам, проводимым с ЖРД после останова;

форму протокола испытания.

Если в процессе производства проводят модернизацию ЖРД, то, естественно, конструкция его претерпевает определенные изменения.

Такой ЖРД на серийном заводе является экспериментальным, его испытания существенно отличаются от испытаний серийных ЖРД. Их проводят с учетом не только ТУ, но и конструкторской программы.

Программа испытаний ЖРД должна состоять из следующих разделов: объект испытаний; цель и задачи испытаний; общие положения (они включают сведения о документе, на основании которого проводят испытание, о месте проведения испытания и цикле отработки); условия, способ и последовательность проведения испытания; проверка готовности ЖРД к испытаниям; материально-техническое обеспечение; метрологическое обеспечение; работы, проводимые после испытания; критерии, на основании которых принимают решение по результатам испытания; требования техники безопасности; отчетность.

Технологическую документацию на испытание составляют на основании конструкторской документации с учетом особенностей стендового оборудования. Она включает технологию проведения испытания, технические указания, операционные карты и протоколы испытания.

Технология проведения серийных испытаний содержит описание процесса подготовки ЖРД и стендового оборудования к работе, испытания и обработки ЖРД после него. В технологии отражены требования к применяемым инструменту и технологической оснастке, методические указания по обеспечению сохранности и чистоты ЖРД, порядок проведения работ с ЖРД, способы выполнения требований конструкторской документации. Технология является основным документом для персонала при проведении испытания.

Для проведения экспериментальных работ на основании конструкторских программ выпускают технологические указания. Они отражают специальные требования, изложенные в программе, определяют способы и порядок их выполнения при проведении эксперимента. Техническое указание является временным документом, его выпускают для работы с одним или партией ЖРД.

Операционная карта содержит перечень технологических операций испытания ЖРД и предназначена для контроля их выполнения. В операционную карту заносят все возникшие в процессе испытания замечания.

Протокол испытания содержит сведения об особенностях испытуемого ЖРД, атмосферных условиях, применяемых компонентах топлива, особенностях проведенного испытания. В протоколе приводят результаты испытания — циклограммы, значения измеренных параметров, отмечают их соответствие ТУ, дают заключение о ЖРД.

7.5.2. Подготовка и проведение испытаний

Рассмотрим пример технологии испытаний маршевого ЖРД на керосине и кислороде. Технология включает следующие процессы:

подготовку технологических требований;

подготовку стенда к монтажу ЖРД;

подготовку ЖРД и стендовых систем к испытанию;

испытание ЖРД;

работы после останова ЖРД.

Все технологические требования учитываются при составлении технологии испытания. Организация работ и взаимодействие служб, участвующих в подготовке и проведении испытания, определяются технологическим планом и разбиваются на этапы по срокам готовности. Принятие готовности позволяет перейти к выполнению следующего этапа работ.

Перед работами на стенде знакомятся с документацией на ЖРД и с целями испытания, комплектуют и корректируют технологическую документацию. Затем меняют арматуру и средства измерения согласно графику регламентных работ, комплектуют трубопроводы, оснастку и крепежные детали, проверяют их на годность и чистоту. Проверяют состояние:

опорных площадок, сварных швов и болтовых соединений на двигательной раме и тягоизмерительном устройстве;

топливных магистралей (чистоту внутренних полостей трубопроводов и фильтров, надежность узлов крепления);

измерительных линий;

грузоподъемных приспособлений, откатных ворот и пола бокса;

газодинамической трубы и лотка.

Подготавливается необходимый объем компонентов топлива и газов высокого давления.

Подготовку ЖРД к испытанию начинают с приемки контейнера с ЖРД в монтажном зале, при этом убеждаются:

в отсутствии повреждений узлов и агрегатов ЖРД;

в цельности контровки и пломб на разъемных соединениях; в наличии технологических заглушек на всех штуцерах и фланцах ЖРД;

в отсутствии коррозии, нарушений лакокрасочных покрытий, забоин, вмятин на ЖРД;

в соответствии узлов и агрегатов паспортным данным.

В монтажном зале вскрывают входы топливных насосов и осматривают в пределах видимости внутренние полости. На входные фланцы

насосов монтируют технологические проставки для исключения повреждений фланцев при монтаже со стендовыми трубопроводами, после чего проверяют герметичность технологических стыков трубопроводов и ЖРД.

Выполняют предварительную проверку элементов систем измерения и управления ЖРД. Подготовленный ЖРД устанавливают на транспортировочную тележку и доставляют на стенд.

ЖРД с помощью гидроподъемника транспортировочной тележки монтируют на раму тягоизмерительного устройства, после чего стыкуют расходные топливные магистрали и трубопроводы продувки, дренажи, трубки измерительных клапанов и кабельные стволы систем измерения и управления. Непременным требованием при стыковке стендовых систем с ЖРД является предотвращение попадания посторонних предметов во внутренние полости трубопроводов и агрегатов и чистота поверхностей. При монтаже для исключения искрообразования применяют инструмент с покрытием (медненый, кадмированный, серебреный). Все трубопроводы и арматура, стыкуемые с ЖРД, должны быть обезжирены. Трубопроводы вскрывают непосредственно перед стыковкой.

При монтаже измерительных каналов по маркировке проверяют их принадлежность определенной линии. Измерительные трубопроводы по линии горючего заливают спиртовой смесью. После этого проверяют герметичность смонтированных соединений и ЖРД в следующей последовательности:

устанавливают технологическую заглушку в критическое сечение сопла камеры сгорания;

устанавливают контрольные манометры для измерения давления в полостях окислителя, горючего и в камере сгорания;

производят наддув воздухом систем горячего и окислителя до давления, определенного технологией;

производит наддув воздухом камеры сгорания;

выдерживают системы под давлением в течение 10 мин;

снижают давление опрессовки до предусмотренного технологией уровня и проверяют герметичность;

уменьшают давление до нуля;

включают "вялую" продувку полостей для исключения попадания в них атмосферного воздуха.

После опрессовки стопорят все элементы крепления.

Важнейшим этапом подготовки ЖРД и стенда к испытанию является комплексная проверка работы стендовой арматуры и узлов управления ЖРД, систем измерения и управления. При этом имитируют запуск ЖРД

без подачи в него рабочих компонентов и без отстрела пиросредств. Работает вся стендовая арматура, участвующая в испытании, а работу клапанов ЖРД имитируют эквивалентами в системе управления. При удовлетворительных результатах комплексной проверки разрешают заправку стендовых баков и подготовку компонентов топлива.

Заправку стендовых баков компонентами и их подготовку к испытанию производят с пульта управления при полном отсутствии на стенде обслуживающего персонала. При подготовке компонентов топлива переохлаждают окислитель, подогревают или охлаждают горючее, насыщают компоненты топлива газами.

Заключительные операции — градуировка и калибровка измерительных приборов и каналов, причем тягоизмерительное устройство градуируют при залитых магистралях подвода компонентов топлива и при рабочих температурах.

Непосредственно перед испытаниями получают заданные температуры окислителя и горючего на входе в ЖРД. После чего подают команды на проведение стендовой арматуры в состояние, соответствующее запуску ЖРД (закрывают дренажи баков, включают наддувы и т.д.). Исполнение этих команд свидетельствует о готовности стенда к запуску ЖРД. При условии правильного набора команд и срабатывания всех клапанов, приведенных в состояние готовности, на пульте загораются табло "Готовность стенда", "Готовность запуска". В последний момент включаются регистрирующие приборы и подача воды на охлаждение газодинамической трубы и лотка. После нажатия кнопки "Запуск" управление ЖРД и стендом осуществляется по заданной программе автоматически.

Лица, проводящие испытания, ведут визуальное наблюдение за работой ЖРД, они обязаны быстро принимать решения при отклонениях в работе ЖРД или стенда от программы и обеспечивать своевременное включение средств пожаротушения.

Останов ЖРД производится автоматически по программе или САЗ по достижении предельных значений контролируемых параметров, или ведущим испытание при аварийной ситуации. Во всех случаях управление арматурой (закрытие клапанов наддувов, открытие отверстий для дренажа и слива, включение продувок и т.д.) выполняется автоматически по программе останова.

После останова ЖРД проводится:

слив компонентов топлива из стендовых баков в хранилище;

приведение стендовых систем в исходное положение;

внешний осмотр ЖРД;

предварительная обработка ЖРД на стенде;

отстыковка стендовых систем от ЖРД, установка заглушек, стопорение некоторых элементов и их пломбирование;

демонтаж ЖРД со стенда и отправка его на участок окончательной обработки.

7.6.3. Обработка ЖРД после испытания

Обработка ЖРД после испытания приобретает особое значение при наметившейся в настоящее время тенденции многоразового использования мощных и дорогостоящих ДУ космических ракет. Многоразовое использование ЖРД позволяет значительно сократить затраты на доводку мощных ДУ при стендовых доводочных испытаниях, что вполне оправдывает некоторое усложнение конструкции ЖРД.

Под обработкой ЖРД понимают комплекс технологических мероприятий, обеспечивающих его очистку после испытания.

Методика обработки определяется конструктивными особенностями ЖРД и свойствами применяемых компонентов топлива. Обработка подразделяется на частичную, предварительную и полную.

Частичную обработку ЖРД после испытания проводят для обеспечения его повторного безаварийного запуска без съема с испытательного стенда.

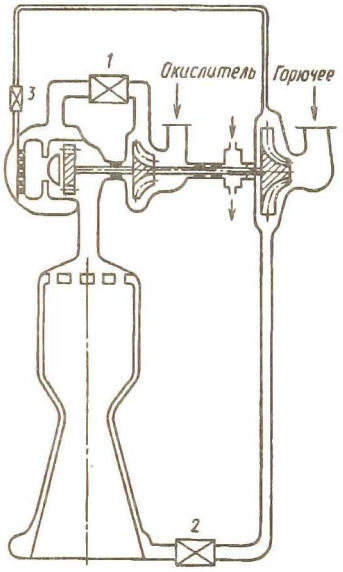
Разумеется, конструкция ЖРД и порядок его останова должны обеспечивать его сохранность и функционирование всех его агрегатов после останова. Очистка необходима для исключения аварийной ситуации при повторном запуске ЖРД из-за наличия остатков компонентов топлива в его полостях после первого испытания и образования опасных концентраций смеси в результате проникновения одного из компонентов в полости, где могут быть остатки другого компонента.

Рассмотрим частичную обработку после испытания на примере ЖРД с дожиганием с окислительным газогенератором, работающим на керосине и кислороде (рис.7.16) и допускающим повторный запуск в стендовых условиях.

Анализируя работу этого ЖРД следует отметить, что после останова — закрытия главных клапанов окислителя 1, горючего 2 и клапана газогенератора 3 — горючее в жидкой фазе остается в охлаждающей полости камеры сгорания, в полости насоса горючего, головке газогенератора, в трубопроводах и агрегатах управления по линии горючего.

При таком порядке останова целесообразно сразу же после останова включить продувку полости горючего газогенератора, что обеспе-

Рис. 7.16. Схема ЖРД с дожиганием:
1, 2, 3 — клапаны окислителя, горючего и газогенератора соответственно



чит более организованный процесс догорания остатков горючего и стабильность импульса последействия. Продувку следует проводить газом, не вступающим в реакцию при высоких температурах с основными компонентами топлива. Это может быть любой инертный газ.

Удаление жидкой фазы из полостей газогенератора необходимо и для воспроизводимости процесса запуска при повторном испытании, так как при отработке запуска ЖРД учитывается время, необходимое для заполнения его полостей компонентами. По этой же причине необходимо слить остатки компонентов из всех полостей ЖРД, для чего должны быть предусмотрены технологические штуцера слива компонентов в нижних точках полостей горючего и окислителя при рабочем положении ЖРД на испытательном стенде.

После слива остатков компонентов топлива концентрация их паров остается довольно высокой. При этом нельзя гарантировать надежный повторный запуск. Для снижения концентрации паров компонентов в полостях ЖРД используют продувку газом. Самым дешевым газом является сжатый воздух. Определяя параметры продувки, необходимо учитывать химическую активность каждого компонента. Но при этом следует более тщательно удалять пары горючего и предохранять полости окислителя от проникновения в них этих паров.

Для предотвращения попадания паров горючего в полости окислителя при частичной обработке достаточно поддерживать в них более высокое давление воздуха, чем в полостях горючего при всех технологических операциях до повторного запуска. Однако следует иметь в виду, что уплотнения насосов окислителя и горючего по валу не обеспечивают полную герметичность, возможно образование опасной концентрации компонентов в разделительной полости между насосами окислителя и горючего. Поэтому необходима постоянная продувка разделительной полости.

В процессе продувки необходимо фиксировать ротор ТНА от проворачивания для исключения возможности выхода из строя опорных подшипников.

В частичную обработку входит также очистка поверхностей огневого днища и стенок камеры сгорания от продуктов неполного сгорания и очистка каналов пиросредств (например, пиросвеч) от коксообразных продуктов сгорания пороха.

Коксообразные продукты сгорания пороха можно удалить продувкой пиросредств водяным паром, технологически исключая при этом попадание его в другие полости ЖРД.

Предварительную обработку ЖРД после испытания проводят перед съемом его со стенда для подготовки к полной обработке. Она включает слив компонентов топлива из полостей, очистку наружных поверхностей камеры сгорания от продуктов неполного сгорания, очистку каналов пиросредств и подготовку ЖРД для отправки на участок полной обработки.

При останове ЖРД на стенках камеры сгорания оседает слой продуктов неполного сгорания, которые при повторном запуске или в процессе транспортировки и хранения могут засорить форсунки, золотниковые пары агрегатов управления и пр.

На огневом днище и на стенках камеры сгорания в основном оседают продукты термического разложения, которые легко удаляются бязевой салфеткой. Ниже критического сечения камеры образуется налет сажи, трудноудаляемый обычной протиркой. В этом случае целесообразно применять различные моющие средства.

Для защиты полостей ЖРД при очистке поверхностей камеры следует проводить постоянную продувку полостей горючего и окислителя воздухом под небольшим давлением, соблюдая при этом требования техники безопасности.

При подготовке ЖРД к полной обработке демонтируют узлы разового пользования, водяным паром очищают каналы пиросредств. Транспортировать ЖРД на участок полной обработки желательно в том же положении, в каком он проходил испытание.

Полную обработку ЖРД после испытания проводят перед отправкой его на длительное хранение, перед началом эксплуатации или перед разборкой для дефектации.

При полной обработке требуется обеспечить минимальный объем остатков компонентов топлива в полостях ЖРД, что является необходимым условием при длительном хранении, при выполнении монтажных работ с помощью сварки и пр.

Полную обработку ЖРД, как правило, проводят на специализированных участках, обеспечивающих выполнение технологического процесса на достаточно высоком уровне.

После испытания на стенде перед полной обработкой ЖРД должен пройти предварительную обработку.

Рассмотрим вариант полной обработки ЖРД, работающего на кислороде и керосине (см. рис.7.16). Плохая испаряемость обусловливает трудности удаления керосина из полостей ЖРД без его разборки. Кислород, наоборот, легко выпаривается и требует только защиты окислительных полостей от проникновения в них паров керосина.

Очистка полостей горючего от керосина включает в себя следующие технологические операции:

промывку — продувку;

продувку горячим воздухом;

вакуумную сушку;

консервацию.

Наиболее эффективным способом удаления остатков керосина из полостей горючего является промывка их бензином, с которым керосин хорошо перемешивается. Полости большого объема заполняют бензином, выдерживают в таком состоянии в течение определенного времени, после чего бензин с частично растворенным в нем керосином сливают. Полости горючего малого объема целесообразно прокачивать бензином.

После слива бензина на стенках полостей горючего остается смесь бензина с керосином в виде пленки, для удаления которой интенсивно продувают полости воздухом. Чтобы обеспечить промывку и продувку всех полостей, в конструкции ЖРД необходимо предусмотреть места заливки и слива бензина, подвода и дренажа воздуха.

При обработке ЖРД по циклу промывка—продувка для защиты окислительных полостей необходимо поддерживать в них избыточное давление воздуха над давлением в полостях горючего, а также осуществлять постоянную продувку разделительной полости насосов. Обработкой ЖРД по циклу промывка—продувка обеспечивается практически полное удаление керосина из полостей горючего, но в них остается высокая концентрация паров углеводородов. Для снижения их концентрации полости горючего продувают горячим воздухом.

Температуру воздуха при продувке выбирают с учетом необходимости сохранности элементов ЖРД — в основном резиновых изделий. Параметры продувки ЖРД горячим воздухом определяют опытным путем, при этом необходимо обеспечить защиту полостей окислителя от попадания в них паров углеводородов.

Вакуумную сушку ЖРД проводят для предотвращения коррозии деталей ЖРД при длительном хранении в результате попадания в него влажного атмосферного воздуха при монтажных работах, а также для дальнейшего снижения концентрации паров углеводородов в полостях горючего.

При вакуумной сушке с ЖРД, установленного в вакуумную печь, снимают все технологические заглушки для сообщения его полостей с атмосферой печи. ЖРД прогревают до заданной температуры и при давлении 10 Па.

Вакуумную сушку можно совместить с продувкой полостей горючего, из которых наиболее трудно удалить керосин.

При консервации ЖРД после вакуумной сушки все его полости заполняют сухим воздухом и герметизируют технологическими заглушками.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой типовая циклограмма контрольного испытания ЖРД?
2. Какие типы динамических испытаний проводят при отработке ЖРД?
3. Какие приемы задания возмущений используются при проведении частотных испытаний ЖРД?
4. Что означает динамическое соответствие условий стендовых испытаний ЖРД условиям его эксплуатации?
5. Приведите критериальные соотношения, обеспечивающие динамическое соответствие.
6. Чем можно обосновать необходимость вибрационно-частотных испытаний?

Глава 8
ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЙ ЖРДМТ

8.1. ЖРДМТ, ТРЕБОВАНИЯ К ИХ ОТРАБОТКЕ И ИСПЫТАНИЯМ

ЖРД с тягой до 1600 Н выделены в особый класс – ЖРДМТ. Конструкция ЖРДМТ существенно отличается от маршевых ЖРД. Они, как правило, не имеют регенеративного охлаждения, ДУ с ЖРДМТ выполняют с вытеснительной подачей топлива. Из-за малых поперечных габаритных размеров ЖРДМТ, необходимости обеспечения заданного соотношения компонентов топлива и защиты стенок от перегрева их системы подвода компонентов топлива в камеру отличаются обычно большой сложностью. Для достижения хороших динамических характеристик топливные клапаны с быстродействующим электромагнитным приводом устанавливают непосредственно на головке камеры. При этом удается обеспечить минимальные заклапанные объемы.

Типичная конструкция ЖРДМТ показана на рис.8.1 на примере двигателя тягой 450 Н. Обычно ЖРДМТ используют в блоках, в которых они объединены общими элементами.

ДУ с ЖРДМТ обычно применяют для успокоения, ориентации, стабилизации, коррекции, сближения, причаливания, стыковки, торможения, спуска, посадки и других операций маневрирования КЛА и СА, а также для придания им ускорения для создания силы тяжести, например, при обеспечении запуска маршевого ЖРД, для отделения частей КЛА и т.п.

Конструкцией большинства ЖРДМТ должна предусматриваться возможность их многократного включения. Дело в том, что при решении задач управления полетом КЛА необходим очень широкий диапазон управляющих сил. Это требование выполняется как путем установки на КЛА ЖРДМТ с различным номиналом тяги, так и путем широкого использования импульсных режимов работы с различной продолжительностью импульса (от нескольких сотых секунды до секунд) и различной частотой включений.

Непрерывные режимы длительностью от нескольких десятых секунды до тысяч секунд составляют обычно небольшую часть ресурса ЖРДМТ.

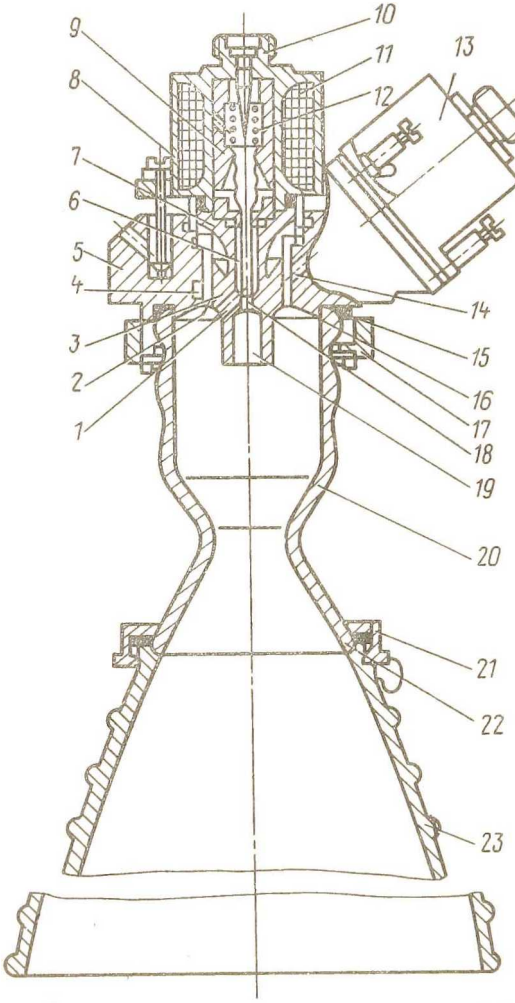


Рис. 8.1. Конструкция ЖРДМТ: 1 — отверстие для окислителя; 2 — отверстие основной форсунки горючего; 3 — форсунка горючего для охлаждения; 4 — коллектор горючего; 5 — головка; 6 — канал подвода окислителя; 7 — вкладыш; 8 — изолятор; 9 — седло; 10 — клапан окислителя; 11 — катушка электромагнита; 12 — пружина; 13 — клапан горючего; 14 — канал подвода горючего; 15 — уплотнение; 16 — форсунка для охлаждения предкамеры; 17 — кольцо; 18 — отверстие для окислителя; 19 — предкамера; 20 — камера; 21 — кольцо; 22 — сопло; 23 — насадок

Работа в импульсном режиме является одной из наиболее типичных особенностей ЖРДМТ. Следует отметить, что имеются разновидности импульсного режима.

Возможен установившийся импульсный режим, при котором стабилизируется форма импульса при постоянной частоте включений. Удельный импульс тяги на этом режиме не зависит от порядкового номера включения.

При неустановившемся импульсном режиме форма импульса не стабилизируется при постоянной частоте включений. Удельный импульс тяги на этом режиме зависит от порядкового номера включения. Возможен режим одиночных включений ЖРДМТ с паузами, в течение которых двигатель приходит в исходное состояние. При этом полностью опорожняются за-

клапанные полости и устанавливается первоначальное тепловое состояние. ЖРДМТ может работать также на режиме со связанными импульсами, при котором тяга или давление в камере в паузах уменьшается до значений, больших 0,1 значения тяги или давления на установившемся непрерывном режиме. При этом рабочее тело или теплота, не использованные при предыдущем импульсе, переходят на последующий.

Основными временными характеристиками импульсного режима являются время включения, выхода на режим, останова, паузы между включениями и частота включений. Используют также термин скважность включения, представляющую собой отношение периода включений (сумма времени включения и паузы) ко времени включения.

ЖРДМТ, как и маршевые ЖРД, должны быть высоко экономичны. Экономичность ЖРДМТ непосредственно сказывается на массе топлива, запасенного на борту КЛА для управления, и влияет на массовые характеристики КЛА. Надо отметить, что имеются трудности обеспечения высокого удельного импульса тяги ЖРДМТ из-за следующих причин:

необходимость выполнения большого числа коротких импульсов, при которых значительную часть времени занимают переходные процессы, сопровождающиеся существенными потерями тепловой энергии;

отсутствие в большинстве случаев регенеративного охлаждения, из-за чего требуется пониженная температура рабочего тела вблизи стенок камеры, которая приводит к дополнительным потерям тепловой энергии;

малые расходы топлива и малые размеры камеры сгорания, которые препятствуют размещению значительного числа форсунок и в итоге затрудняют создание оптимального соотношения компонентов топлива в ядре потока и в пристеночном слое.

Чрезвычайно важны динамические характеристики ЖРДМТ – зависимости времени переходных процессов от режима и условий работы. Большие усилия, как правило, прикладывают для обеспечения минимального времени включения и минимальной задержки появления тяги после выдачи соответствующей команды. На уровень динамических характеристик в основном влияют такие факторы, как быстродействие клапанного механизма, время заполнения заклапанных объемов и задержка воспламенения.

ЖРДМТ работают, как правило, при низком давлении окружающей среды, близком к вакууму, и значительных колебаний температуры его элементов и компонентов топлива в зависимости от положения на КЛА

относительно Солнца. На тепловое состояние ДУ может также оказывать влияние режим работы самих ЖРДМТ. Низкое давление окружающей среды очень затрудняет процесс запуска, поскольку приводит к увеличению времени задержки воспламенения.

Общий ресурс ЖРДМТ, под которым понимают суммарную наработку по времени при непрерывном и импульсном режимах работы, определяется ТЗ на его разработку. Он может быть значительным (десятки тысяч секунд). Число включений достигает сотен тысяч. При этом требуется высокая стабильность воспроизводимости импульсов.

Специфические условия работы ЖРДМТ и относительно небольшой уровень их тяги обусловливают ряд особенностей и накладывают определенные ограничения на организацию рабочего процесса, схему и конструкцию этих двигателей, а также на методы и средства их отработки и контроля. Поэтому вопросы, связанные с исследованиями и испытаниями ЖРДМТ, выделены в специальную главу. Здесь же рассмотрены некоторые особенности испытаний газовых ракетных двигателей, в которых в качестве рабочего тела используется сжатый газ. Несмотря на более низкую, чем у двухкомпонентного ЖРДМТ, экономичность, они просты по своей конструкции, надежны, обладают высоким быстродействием. В ряде случаев их успешно применяют в ДУ с малым полным импульсом I.

Следует отметить, что некоторые особенности отработки ЖРДМТ диктуют необходимость создания специального испытательного оборудования и применения специфических методов испытаний и измерений.

Как отмечалось, основной рабочий режим ЖРДМТ импульсный, поэтому первоочередной задачей при проведении исследований ЖРДМТ является отработка и оценка их энергетических и динамических характеристик в импульсном режиме. При этом возникает необходимость измерения импульса тяги

$$I = \int_0^{\tau_и} P d\tau \qquad (8.1)$$

и среднего удельного импульса тяги за отдельный импульс

$$I_{у.и} = I / \int_0^{\tau_и} \dot{m} d\tau = I / m_и, \qquad (8.2)$$

где P – тяга; $m_{и}$ – масса топлива (рабочего тела), израсходованного за время импульса $\tau_{и}$.

Решение подобной задачи затруднено, поскольку в настоящее время практически отсутствуют стандартные средства измерения, позволяющие с приемлемой точностью измерять мгновенные значения тяги и расходов компонентов топлива. Причем эти трудности возрастают с уменьшением продолжительности импульса. Поэтому приходится разрабатывать и использовать измерительное оборудование и применять методы, которые обычно не применяют при исследованиях маршевых ЖРД.

Большинство ЖРДМТ работают в глубоком вакууме, и, следовательно, значительный объем испытаний по их отработке следует проводить в этих условиях, т.е. на стендах, оборудованных вакуумными камерами. Известно, например, что как на энергетические, так и на динамические характеристики ЖРДМТ существенно влияет изменение задержки воспламенения. При разработке нового ЖРДМТ для достижения приемлемого уровня задержки воспламенения приходится выполнять значительный объем экспериментальных работ. Так как уровень давления в камере сгорания на этапе запуска существенно влияет на значение задержки воспламенения, а наиболее типичными для запуска ЖРДМТ являются условия вакуума, то такие испытания ЖРДМТ проводят в вакуумных камерах.

Различают *высотные* испытания ЖРДМТ – огневые испытания при полном расширении газов в сопле, *вакуумные* – огневые испытания в вакуумной камере при давлении в ней ниже 1 Па и *термовакуумные* – огневые вакуумные испытания при заданной температуре компонентов топлива и элементов конструкции.

Специфичным для практики отработки ЖРДМТ является также и то, что испытания по оценке работоспособности проводят не только на общий, но и на назначенный ресурс по числу включений. В связи с тем что параметры электрического тока, подаваемого на топливные клапаны, оказывают заметное влияние на характеристики ЖРДМТ, предусматривают испытания с изменением параметров электропитания в эксплуатационном диапазоне изменения напряжений и температуры конструкции.

Проверяют работоспособность блока ЖРДМТ на КЛА по циклограмме включений, близкой к штатной. Испытания проводят в термобарокамере с имитацией давлений окружающей среды и теплового состояния конструкции и компонентов топлива.

8.2. ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ЖРДМТ

Требования к измерениям при испытаниях ЖРДМТ являются более жесткими, чем при испытаниях маршевых ЖРД. Связано это в основном с необходимостью исследования быстроменяющихся параметров в импульсном режиме работы с малыми по абсолютному значению секундными расходами компонентов топлива и малыми тягами. Так как неустановившиеся процессы составляют значительную долю импульса, то погрешности, связанные с изменением быстроменяющихся параметров, могут привести к существенным неточностям в определении абсолютного и удельного значений импульса тяги, формы импульса. Уменьшение погрешностей измерений достигается в ряде случаев путем использования специальных средств измерения, а также специальных методов обработки результатов испытаний, при которых осуществляется коррекция динамических искажений, выполняемая автоматизированными ИИС.

В настоящем подразделе рассмотрены лишь те методы и средства измерений, которые присущи ЖРДМТ и, как правило, не являются стандартными. Как отмечалось, их особенность обусловлена, в первую очередь, необходимостью оценки параметров в импульсном режиме работы, при котором качество переходных процессов существенно сказывается на характеристиках ЖРДМТ.

8.2.1. Измерение тяги

Чтобы определить экономичность ЖРДМТ, работающих в импульсных режимах, необходимо знать текущее значение тяги и характер ее изменения во времени. Для оценки непрерывного режима используют среднее значение тяги P на этом режиме, а импульсного – $\int_{\tau_1}^{\tau_2} P d\tau$ за время импульса. По этим величинам определяют удельные импульсы тяги соответственно на непрерывном и импульсном режимах. Поскольку эти параметры являются основными при оценке ЖРДМТ, то к точности их определения предъявляют жесткие требования.

О тяге, создаваемой ЖРДМТ, можно судить либо по силе реакции, с которой воздействуют узлы крепления, расположенные на испытательном станке, на ЖРДМТ, препятствуя его перемещению при работе в направлении действия тяги, либо по импульсу силы, создаваемому в единицу времени истекающими из сопла газообразными продуктами сго-

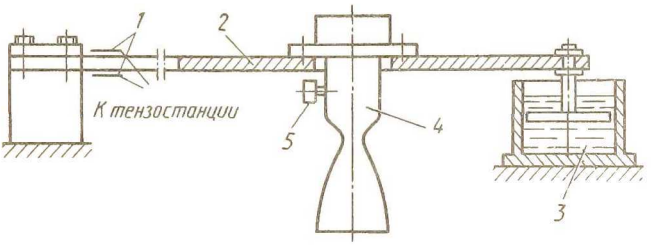


Рис.8.2. Схема реактивного тягоизмерительного устройства: 1 – тензопреобразователь; 2 – балка упругая; 3 – демпфер; 4 – ЖРДМТ; 5 – преобразователь для измерения $p_к$ первичный

рания. Эти два метода, используемые при измерении тяги ЖРДМТ, названы соответственно реактивным и активным. При применении этих методов используют различные по конструктивному исполнению устройства.

Среди реактивных тягоизмерительных устройств широкое распространение получило устройство в виде консольно закрепленной на массивной опоре упругой балки, на которую монтируется ЖРДМТ, чаще всего в вертикальном положении, соплом вниз (рис.8.2). При работе балка прогибается и по значению упругой деформации можно определить значение действующей тяги. Возникающие в балке напряжения регистрируются, например, с помощью двух тензопреобразователей, наклеенных на противоположные стороны балки для увеличения сигнала и компенсации температурного воздействия окружающей среды. Чтобы быстро погасить колебания упругой системы, появляющиеся в момент начала и окончания работы ЖРДМТ, а также при переходе с одного режима на другой, применяется гидравлический демпфер.

Рассмотренное устройство обеспечивает высокую точность измерения тяги на установившихся режимах работы. Однако при малой продолжительности импульса точность измерений существенно снижается. Связано это с тем что в реактивном тягоизмерительном устройстве ЖРДМТ монтируется на чувствительном элементе – балке, что приводит к увеличению суммарной массы элемента и в конечном счете не позволяет получить необходимую для регистрации быстроменяющейся тяги высокую собственную частоту колебаний измерительной системы. Она может быть определена по формуле

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{P}{(m_{дв} + \epsilon m_{б})\Delta}}, \qquad (8.3)$$

где P – тяга; $m_{дв}$ и $m_{б}$ – соответственно массы ЖРДМТ и части упругой балки, участвующей в колебательном движении; ϵ – коэффициент, зависящий от взаимного расположения ЖРДМТ и балки; Δ – перемещение центра масс ЖРДМТ под действием тяги P.

Анализ показывает, что собственные частоты колебаний механической части реактивного тягоизмерительного устройства не превышают 200 Гц.

Частоту собственных колебаний механической части тягоизмерительного устройства удается существенно (на несколько килогерц) увеличить при активном методе, когда измеряется не реакция истекающих из сопла газов, а прямое силовое воздействие сверхзвуковой струи. При этом методе ЖРДМТ (рис.8.3) фиксируется, а за соплом устанавливается легкая газоприемная ловушка закрытого типа, обеспечивающая поворот газов строго на угол 90° по отношению к оси ЖРДМТ и их отвод в радиальном направлении. Ловушка жестко связана с мембраной, являющейся упругим силовым элементом тягоизмерительного устройства. Мембрана рассчитывается на заданную силу, а ее прогиб определяется возможностями первичного преобразователя 5. Для повышения собственной частоты колебаний механической части тягоизмерительного устройства целесообразны возможно меньшие перемещения. Для регистрации малых перемещений может быть приспособлена серийная аппаратура, предназначенная для измерения давления. Например, в конструкции одного из активных тягоизмерительных устройств использован преобразователь ДД-10 со срезанной мембраной, при этом

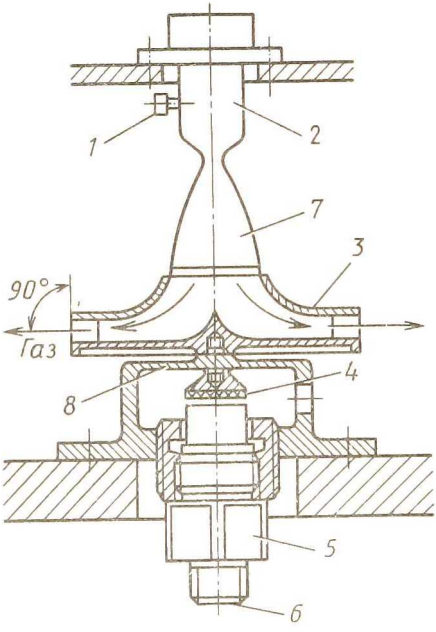


Рис.8.3. Схема активного тягоизмерительного устройства: 1 – преобразователь для измерения $p_{к}$ первичный; 2 – ЖРДМТ; 3 – ловушка; 4 – феррит; 5 – преобразователь первичный типа ДД-10; 6 – разъем; 7 – сопло; 8 – мембрана

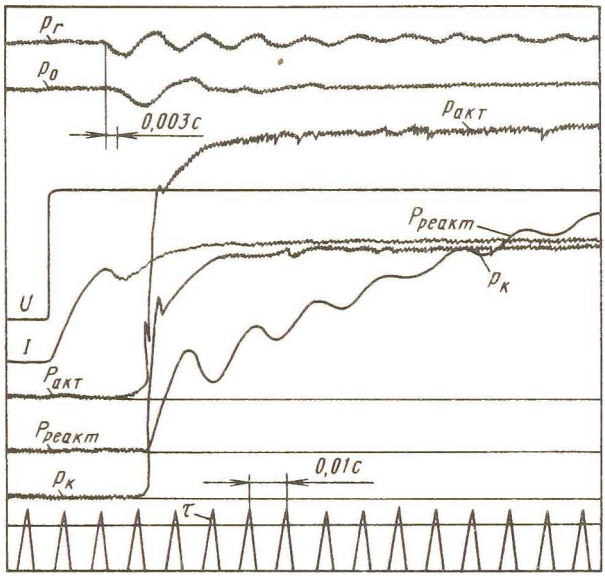


Рис. 8.4. Фрагмент осциллограммы с записью тяги ЖРДМТ активным и реактивным тягоизмерительными устройствами

собственная частота колебаний механической части тягоизмерительного устройства составляла 1450 Гц.

На рис.8.4 приведен фрагмент осциллограммы для режима запуска с записью тяги ($P_{ном}$ = 25 Н), измерявшейся одновременно реактивным ($f_{собств}$ = 55 Гц) и активным ($f_{собств}$ = 1450 Гц) тягоизмерительными устройствами. Здесь же показаны изменения давлений на входе ЖРДМТ по линиям горючего $p_г$, окислителя $p_о$, в камере сгорания $p_к$, силы тока I и напряжения U на обмотке электромагнита топливных клапанов, а также отметки времени τ. Из сравнения представленных на осциллограмме данных видно, что результаты измерения тяги активным тягоизмерительным устройством хорошо отражают изменение давления в камере сгорания. Определение же тяги на переходных режимах реактивным тягоизмерительным устройством затруднительно из-за влияния инерционных и демпфирующих сил. Инерционные силы существенны в связи со значительной массой ЖРДМТ и балки.

Отсутствие в настоящее время точных методов газодинамического расчета ловушки делает необходимым использование экспериментальных методов подбора ее размеров и проведение градуировки. Градуировку

производят путем сравнения показаний активного и реактивного тягоизмерительных устройств при измерении одной и той же стационарной силы. При этом запуски ЖРДМТ проводят при различных $p_к$, а для каждого $p_к$ определяют поправочный коэффициент

$$\xi = P_{реакт}/P_{акт}, \qquad (8.4)$$

где $P_{реакт}$, $P_{акт}$ – значения тяги в пустоте, измеренные реактивным и активным тягоизмерительными устройствами.

Коэффициентом ξ учитываются не поддающиеся теоретическому анализу газодинамические особенности течения струи за соплом ЖРДМТ в сильно разреженной среде и на входе в активное тягоизмерительное устройство, в том числе неточности выбора расстояния от среза сопла до ловушки, ее формы и размеры. В качестве эталона при градуировке активных тягоизмерительных устройств можно использовать и другие высокочастотные тягоизмерительные устройства, применяемые для измерения тяги на установившихся режимах, например вибрационно-частотные преобразователи.

Зависимость $\xi = f(p_к)$ позволяет вносить поправки масштабного коэффициента при обработке осциллограммы записи быстропеременной тяги активным тягоизмерительным устройством, при этом используют среднеинтегральное значение давления в камере сгорания за импульс.

Участок набора тяги ЖРДМТ обычно характеризуется рабочими частотами $f_р$ = 80...100 Гц. При десятикратном превышении f над $f_р$, что реализуется в активных тягоизмерительных устройствах, предельная погрешность измерения тяги активным методом не превышает 3 %.

8.2.2. Измерение расходов компонентов топлива

Наряду с тягой, расходы компонентов топлива позволяют оценить экономичность ЖРДМТ, поэтому точность их измерения должна быть высока. Особенности измерения расходов при испытаниях ЖРДМТ обусловливают их малыми значениями, значительным изменением в течение переходного процесса и пульсацией, вызываемой волновыми явлениями в трубопроводах.

Обычно измеряют объемный расход компонентов топлива за время работы ЖРДМТ как в непрерывных, так и в импульсных режимах, а затем пересчитывают на массовый расход. Так как практически отсутст-

вуют средства, позволяющие с удовлетворительной точностью фиксировать мгновенные значения расходов компонентов топлива, то ставят задачу экспериментального определения расхода в единицу времени или суммарного расхода за импульс.

При проведении испытаний ЖРДМТ применяют турбинные расходомеры и в то же время широкое распространение получили объемные расходомеры, выполненные в виде стеклянной калиброванной трубки в сочетании с миллиметровой шкалой. Постоянство диаметра по длине трубки расходомера обеспечивает линейность его характеристик. Диаметр трубки подбирают таким образом, чтобы обеспечивалась возможность фиксации с достаточной точностью изменения уровня при самом коротком импульсе (например, 10...15 мм для импульса продолжительностью 0,05 с).

Для измерения расхода в непрерывном режиме параллельно основному – объемному расходомеру устанавливают дополнительную мерную емкость в виде бачка, проградуированную совместно с основным расходомером. В суммарную погрешность измерения расходов входят погрешности градуировок расходомеров, погрешности отсчета уровня при измерении, погрешности определения плотности компонентов топлива, в том числе и связанные с определением их температуры. Данный метод позволяет обеспечивать точность измерений, при которой предельная погрешность определения массового расхода на непрерывном режиме находится в пределах ±2 %, а расхода за импульс – в пределах ±2,5 %.

Большим недостатком описанного метода измерения расхода является трудность непосредственного ввода получаемой информации в автоматизированные ИИС и обработки результатов испытаний. В связи с этим все большее распространение для измерения расходов компонентов топлива находят расходомеры, информация с которых может быть легко преобразована в параметры электрического тока. К этому типу измерительных средств относятся, например, сильфонные и ультразвуковые расходомеры.

Схема работы сильфонного расходомера представлена на рис.8.5. При работе ЖРДМТ компонент топлива вытекает из внутренней полости сильфона 3, находящегося под рабочим давлением, и поступает через клапан 4 в камеру сгорания. С подвижной стенкой сильфона жестко связан первичный преобразователь перемещения 5, регистрирующий его осевую деформацию. Сильфон заправляется компонентом топлива в перерывах между включениями через заправочный клапан 2 из емкости 1. Команда на открытие и закрытие заправочного клапана вырабатывается

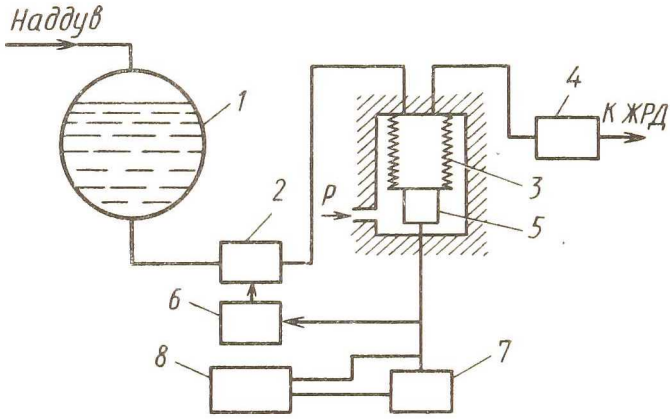


Рис. 8.5. Схема сильфонного расходомера:
1 — емкость; 2 — клапан заправочный; 3 — сильфон; 4 — клапан; 5 — преобразователь перемещения первичный; 6 — блок управления; 7 — блок дифференцирования; 8 — регистратор

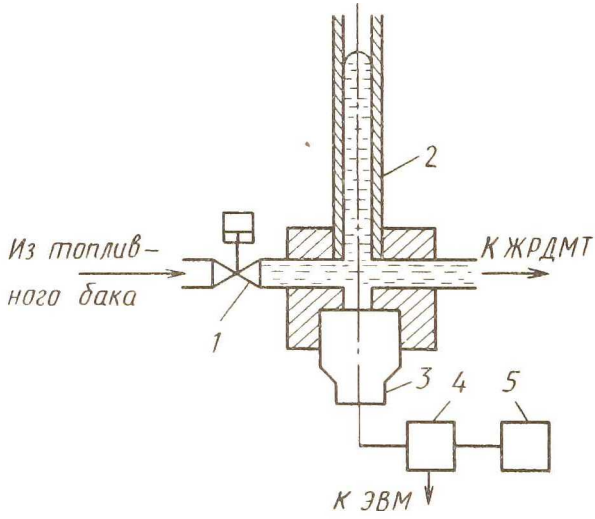


Рис. 8.6. Схема ультразвукового расходомера:
1 — клапан; 2 — участок расходомерный; 3 — излучатель-приемник; 4 — блок управляющий электронный; 5 — устройство визуального отсчета измерений

блоком управления 6 в зависимости от сигналов регулятора и первичного преобразователя перемещения. Блок дифференцирования 7 преобразует сигнал перемещения в скорость перемещения и позволяет таким образом определять как мгновенные значения расходов, так и объемный расход за импульс. Сигналы от блока дифференцирования и первичных преобразователей перемещений могут поступать как на регистратор 8, так и в систему автоматизированной обработки результатов испытаний.

Работа ультразвукового расходомера (рис.8.6) основана на принципе ультразвуковой локации уровня компонентов топлива в расходомерном участке 2, куда жидкость поступает через клапан 1. Излучатель-приемник 3 выдает модулируемые прямоугольными импульсами ультразвуковые колебания. Между излучаемыми и отраженными от верхнего мениска импульсами имеется временной интервал, пропорциональный высоте столба жидкости. В электронном управляющем блоке 4 происходит преобразование сигнала, который вводится затем в ЭВМ и может также передаваться на устройство визуального отсчета измерений 5. К одному электронному блоку может быть подключено несколько излучателей-приемников.

Порог чувствительности, определенный экспериментально для некоторых штатных топлив, находится на уровне 0,1 мм. Основная предельная погрешность измерения не превышает 0,5 %. Она зависит от степени поглощения ультразвуковых колебаний рабочей жидкостью. Для уменьшения этого влияния следует повышать мощность излучателя-приемника. Однако необходимо отметить, что существенная дополнительная погрешность измерения может возникнуть из-за изменения температуры компонента. Для некоторых топлив она достигает 0,35 % на 1° изменения температуры, что объясняется зависимостью скорости звука в жидкости от ее температуры. Дополнительную погрешность из-за влияния температуры можно уменьшить двумя путями – коррекцией градуировочной характеристики по измеренной температуре компонента топлива либо коррекцией по калибровочному сигналу, полученному при фиксированных уровнях рабочей жидкости.

8.2.3. Измерение давлений

Давления в камере сгорания, топливных и пневматических магистралях измеряют в основном с помощью стандартных средств измерения. При этом достигается удовлетворительная точность измерений стационарных значений давления на непрерывных режимах работы.

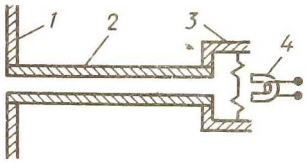


Рис.8.7. Схема соединения первичного преобразователя давления с камерой сгорания: 1 – камера сгорания; 2 – трубопровод соединительный; 3 – полость подмембранная; 4 – преобразователь первичный

Более сложной является задача определения давлений в импульсных режимах работы, так как при этом возможны динамические искажения, вносимые измерительным каналом. Дело в том, что небольшие размеры камер сгорания испытуемых ЖРДМТ и высокие температуры газов часто не позволяют устанавливать существующие первичные преобразователи давления непосредственно на камеру. В этом случае камера сгорания с первичным преобразователем соединяется трубопроводом (рис.8.7). Особенно характерно это для серийных ЖРДМТ. Введение трубопровода – промежуточного звена, обладающего определенными газодинамическими характеристиками, приводит к различию между реальными и измеренными значениями давления.

Динамическая характеристика простейшего газодинамического соединительного звена с достаточной степенью точности описывается дифференциальным уравнением второго порядка

$$\frac{1}{\omega_т^2}\frac{dp_м^2}{d\tau^2} + \frac{2\xi_т}{\omega_т}\frac{dp_м}{d\tau} + p_м = p_к, \qquad (8.5)$$

где $p_м$ – давление под мембраной первичного преобразователя; $p_к$ – давление в камере сгорания; $\xi_т$ – коэффициент затухания колебаний в трубопроводе.

Частота колебаний трубопровода $\omega_т$ определяется геометрическими параметрами соединительного устройства:

$$\omega_т = \frac{a}{l_т}\sqrt{\frac{V_т}{V_м}}\,. \qquad (8.6)$$

Здесь a – скорость звука; $l_т$ – длина трубопровода; $V_т$ – объем трубопровода; $V_м$ – объем полости под мембраной.

Коэффициент затухания $\xi_т$ обычно определяют экспериментально, его значение находится в пределах 0,8...2,4. При неизменной длине

трубопровода динамические искажения давления увеличиваются с уменьшением площади сечения трубопровода и увеличением объема полости под мембраной. На рис.8.8 приведен пример осциллограммы, полученной при измерении давления с динамическими искажениями, вызванными наличием соединительного трубопровода.

При увеличении площади сечения трубопровода динамическая погрешность измерения уменьшается, но при площади сечения, соизмеримой с площадью минимального сечения камеры сгорания, происходит искажение процесса в камере сгорания из-за увеличения присоединенного объема и из-за колебаний расхода на переходных режимах работы ЖРДМТ.

При разработке системы измерения давления необходимо оптимизировать значение площади сечения трубопровода, обеспечивающей допустимые изменения процесса в камере сгорания и не допускающей слишком большие динамические погрешности. Однако для ЖРДМТ с номинальной тягой менее 1 Н даже оптимальный выбор геометрических размеров соединительного трубопровода не обеспечивает достаточную точность измерения. В этом случае целесообразно применять специальные методы обработки результатов испытаний, суть которых сводится к восстановлению $p_к(\tau)$ по измеренному значению $p_м(\tau)$. Взаимосвязь этих величин описывается выражением (8.5).

Из выражения (8.5) следует, что для восстановления значения $p_к(\tau)$ необходимо вычислить первую и вторую производные от функции $p_м(\tau)$. Однако значение $p_м$ известно с погрешностью, обусловленной несовершенством измерительной аппаратуры. Легко показать, что при

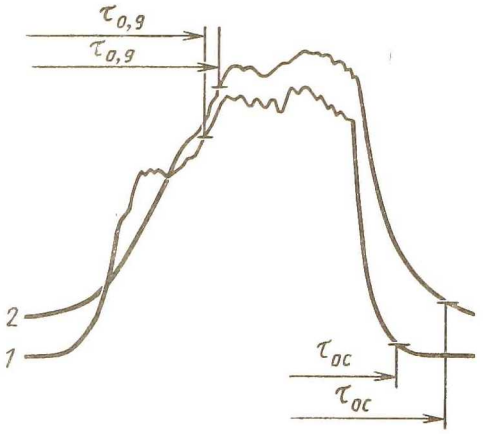


Рис.8.8. Осциллограммы давления в ЖРДМТ, записанные с помощью первичного преобразователя:
1 — установленного непосредственно на камере сгорания; 2 — соединенного с камерой сгорания трубопроводом; $\tau_{0,9}$ — время выхода на режим $p_к = 0,9p_{к.ном}$; $\tau_{ос}$ — время останова

этом возможно вычисление производной с очень большой погрешностью. Например, если погрешность равна $A\sin\omega\tau$, то измеренное давление

$$p_м = p_{м1} + A\sin\omega\tau. \qquad (8.7)$$

Здесь $p_{м1}$ – действительное значение давления в полости под мембраной (без погрешности измерительной аппаратуры); A – максимальное значение погрешности. Абсолютная погрешность измерения $p_м$ не превышает $|A|$. Найдем производную $\frac{dp_м}{d\tau}$:

$$\frac{dp_м}{d\tau} = \frac{dp_{м1}}{d\tau} + A\omega\cos\omega T. \qquad (8.8)$$

Погрешность производной $\frac{dp_м}{d\tau}$ может достичь значения $|A\omega|$ и быть сколь угодно большой при увеличении ω.

Подобные задачи, малые изменения исходных данных в которых приводят к очень большим изменениям решения, относятся к классу так называемых некорректно поставленных задач. Один из возможных методов решения таких задач связан с идеей регуляризации. Суть ее состоит в том, что уравнение типа (8.5) преобразуется с помощью введения дополнительных сомножителей – операторов в другое уравнение, решение которого устойчиво. Например, при определении первой производной правую часть уравнения (8.7) следует умножить на оператор $1/(1 + a\omega)$, где a – параметр регуляризации, зависящей от погрешности измерения. При этом малые значения ω практически не оказывают влияния на решение, при больших значениях ω этот оператор компенсирует неустойчивую часть в выражении (8.8). Подробно методы решения некорректно поставленных задач рассмотрены, например, в работе [11].

Следует отметить, что подобная обработка результатов измерений эффективна лишь при использовании автоматизированных ИИС.

Другой подход к задаче восстановления $p_к(\tau)$ возможен, если представить импульс давления и передаточную функцию измерительного канала математическими моделями [11].

8.3. СТЕНДЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ЖРДМТ

8.3.1. Виды испытательных стендов, их состав

Стенды для испытаний ЖРДМТ предназначены для исследования и отработки их рабочего процесса, определения надежности, а также оценки и контроля основных параметров и характеристик. Поскольку стенды для проведения холодных испытаний элементов и систем ЖРДМТ в принципе подобны аналогичным стендам для ЖРД, они здесь не рассмотрены. Огневые стенды подразделяют на наземные и высотные. На наземных стендах обычно проводят отработку стационарных режимов работы ДУ, камер сгорания и газогенераторов, а также исследования и контроль пусковых характеристик ЖРДМТ, используемых на малых высотах.

Большинство ЖРДМТ предназначено для работы при низких давлениях окружающей среды, и поэтому их испытания проводят на высотных стендах в условиях, приближенных к условиям космического пространства. Так как полная имитация всех условий открытого космоса при стендовых испытаниях чрезвычайно сложна и в принципе не является необходимой для отработки и контроля характеристик ЖРДМТ, то обычно обеспечивают лишь частичную имитацию и, в первую очередь, по давлению окружающей среды. Влияние такого фактора как невесомость проверяют, как правило, отдельно.

При определении тяговых характеристик и характеристик по удельному импульсу откачивающая система стенда должна создавать такое давление, чтобы в течение всего времени работы обеспечивалось безотрывное течение газа в сопле. При исследовании пусковых характеристик ЖРДМТ требуется создание в барокамере более глубокого начального вакуума.

Как правило, стенд должен обеспечивать возможность проведения испытаний ЖРДМТ при низких давлениях как в непрерывных, так и в импульсных режимах. Для этого вакуумные системы должны обеспечивать непрерывную откачку продуктов сгорания от ЖРДМТ или полное их замораживание с помощью криогенных вакуумных панелей-конденсаторов. Стенд с непрерывной откачкой продуктов сгорания называется р а с х о д н ы м. Стенд, не обеспечивающий непрерывную откачку продуктов сгорания, называется н е р а с х о д н ы м. Время работы нерасходного стенда лимитируется поверхностью замораживающих панелей или при их отсутствии объемом барокамеры и тягой, разви-

ваемой ЖРДМТ, так как в последнем случае в барокамере происходит накопление отработавших газов.

На расходном и нерасходном стендах с замораживающими панелями противодавление за срезом сопла в процессе работы ЖРДМТ остается постоянным, а на нерасходном без замораживающих панелей – увеличивается. В связи с этим нерасходный стенд без замораживающих панелей должен иметь как минимум такой объем вакуумной камеры, при котором во время проведения испытаний в непрерывном режиме обеспечивается работа ЖРДМТ без входа скачков уплотнения в сопло в течение 1,0...1,5 с. Этого времени достаточно для измерения параметров, хотя тепловое состояние ЖРДМТ может и не установиться.

При проведении испытаний ЖРДМТ в импульсных режимах давление в вакуумной камере стенда в конце серии импульсов не должно превышать давления, при котором происходит отрыв потока от стенок сопла.

В общем случае стенд для испытаний ЖРДМТ должен включать вакуумную камеру с системой вакуумирования, топливную систему, системы управления агрегатами стенда и ЖРДМТ, нейтрализации продуктов сгорания и сточных вод, содержащих токсичные вещества, термостатирования конструкции ЖРДМТ и компонентов топлива, подачи хладагента для охлаждения криогенных конденсаторов, измерения параметров ЖРДМТ и стендовых систем.

Системы вакуумирования отличаются большим разнообразием. Как правило, в подобную систему включаются несколько групп механических насосов, в том числе форвакуумные насосы для создания начального вакуума и основные насосы, обеспечивающие расчетный вакуум в испытательной камере. Число насосов определяется их подачей. Давление в вакуумной камере следует выбирать с учетом газовыделения работающих ЖРДМТ. Большинство задач по отработке ЖРДМТ, включая исследование рабочих процессов, теплового режима, определения надежности и ресурса ЖРДМТ, могут быть решены, если остаточное давление в вакуумной камере не превышает 1 Па в безрасходном и 10^2 Па в непрерывном режимах работы. Насосы соединяются между собой и с вакуумной камерой с помощью вакуумного коллектора, в котором имеются вакуумные затворы и криогенные панели, охлаждаемые жидким азотом, предназначенные для поддержания низкого давления в вакуумной камере и окончательной очистки поступающих в вакуумные насосы продуктов. При необходимости выхлоп из вакуумных насосов производится в устройство для дожигания продуктов неполного сгорания.

Топливная система включает системы хранения и подачи компонентов топлива, в том числе систему наддува для вытеснения топлива, а также устройства для определения расходов компонентов. В состав топливной системы входит система термостатирования топлива. Ее назначение – подогрев или охлаждение компонентов топлива до заданной температуры с помощью термостатов, установленных перед ЖРДМТ.

В топливных и пневматических магистралях устанавливают запорные вентили, пневмо- и электроклапаны. В системах стенда имеются агрегаты с ручным и дистанционным управлением. Агрегаты с ручным управлением используют при подготовке технологических систем к работе. Агрегаты с дистанционным управлением можно включать вручную, индивидуально или отдельными группами, а также автоматически от программного устройства. Индивидуальное управление используют в основном при проведении подготовительных операций (при заправке компонентами топлива стендовых емкостей, подаче топлива к ЖРДМТ, дренаже и продувке стендовых магистралей, подаче хладагента в системы термостатирования, вымораживании паров компонентов и продуктов сгорания и т.д.). При выполнении отдельных операций возникает необходимость как в одновременном срабатывании агрегатов, так и в срабатывании их в определенной последовательности. Для включения применяют стендовые программные устройства, установленные на пульте управления стендовыми системами. В их работе используют команды, получаемые с различных устройств, сигнализирующих о выполнении предыдущей операции (например, с концевых выключателей) или о достижении параметром предельного значения. Требуемые задержки между отдельными операциями осуществляются с помощью реле времени. Система нейтрализации сточных вод служит для обезвреживания воды, которую используют для обмывания наружных поверхностей баков, клапанов, уровнемеров и т.п.

При испытании ЖРДМТ по циклограммам, имитирующим режимы летной эксплуатации, применяют программные устройства, обеспечивающие автоматическое управление ЖРДМТ по заданной программе.

8.3.2. Примеры выполнения испытательных стендов и их систем

Если целью испытаний ЖРДМТ является лишь измерение тяги на непрерывном режиме, то, как отмечено, требования по поддержанию постоянного уровня давления в вакуумной камере могут быть снижены, поскольку в этом случае достаточно обеспечить лишь полное расшире-

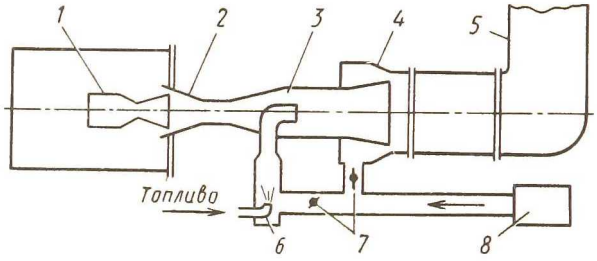


Рис.8.9. Схема системы непрерывного вакуумирования:
1 – ЖРДМТ; 2 – диффузор; 3 – ступень эжектора первая; 4 – ступень эжектора вторая; 5 – труба выходная; 6 – форсунка; 7 – заслонка; 8 – система подачи воздуха

ние газов в сопле. Необходимое разрежение может быть достигнуто благодаря использованию кормового диффузора в сочетании с одно- или многоступенчатым эжектором (рис.8.9).

Необходимое давление на выходе из сопла ЖРДМТ 1 обеспечивается путем установки кормового сверхзвукового диффузора 2 и газовоздушного эжектора. В первой ступени 3 эжектора используется газ с температурой 1000...1200 К. Здесь наряду с эжекцией происходит дожигание продуктов неполного сгорания топлива в ЖРДМТ. Во вторую ступень 4 эжектора подается холодный воздух и при этом температура продуктов сгорания понижается до 700 К. По выходной трубе 5, оборудованной средствами шумоглушения, газ выбрасывается в атмосферу. Охлаждение стенок кормового диффузора и камеры смешения первой ступени эжектора осуществляется водой, пропускаемой через рубашки охлаждения этих элементов. Горячий газ образуется при сгорании горючего, подаваемого в форсунки 6 по трубопроводу в воздухе, поступающем из системы 8. Подача воздуха регулируется дроссельными заслонками 7.

В ряде случаев при отработке ЖРДМТ важно обеспечить низкий начальный вакуум при его запуске и возможность проведения длительных испытаний на непрерывных и импульсных режимах. При этом систему вакуумирования целесообразно делать комбинированной – на базе механических насосов и эжекторов (воздушных, газовых или паровых в зависимости от конкретных условий).

В горизонтальной цилиндрической вакуумной камере 20 (рис.8.10) подобного стенда, состоящей из неподвижного днища и откатной части, располагается испытуемый ЖРДМТ 19, который крепится на станке, смонтированном на днище камеры. Компоненты топлива подаются к

ЖРДМТ из баков, находящихся в герметичных топливных шкафах 6 и 7, имеющих вентиляцию. Снаружи днища камеры расположены отсечные топливные клапаны 13 и 14.

Для обезвреживания сточных вод, содержащих токсичные вещества и продукты сгорания, служит система нейтрализации, в которой возможность взаимодействия компонентов топлива исключена путем раздельного их слива и нейтрализации. Для обезвреживания сточные воды с примесью горючего и его производных пропускают через соответствующие нейтрализующие вещества (сточные воды из топливного шкафа 6 – через вентиль 11, из вакуумной камеры – через задвижку 21, из конденсатных баков – через вентили 29, 30, 31). Сточные воды собираются и нейтрализуются в двух независимо работающих нейтрализационных емкостях 25 и 26. При проведении процесса нейтрализации в одной емкости вторая емкость служит сборником сточных вод. После окончания очистки сточной воды функции емкостей меняются. Очищенная вода сливается из емкостей через вентили 32 и 33.

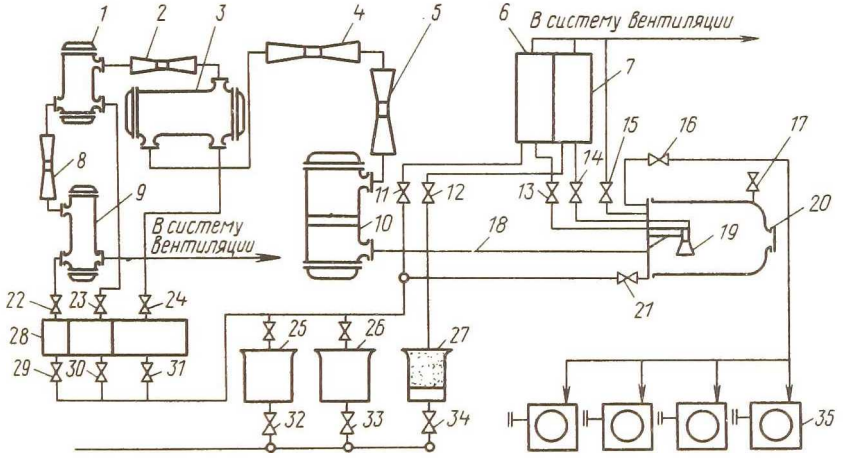


Рис. 8.10. Структурная схема вакуумного стенда с пароэжекторным и механическими насосами:

1, 3, 9 – конденсаторы кожухотрубчатые; 2, 4, 5, 8 – ступени пароэжекторного насоса; 6, 7 – шкафы горючего и окислителя; 10 – теплообменник; 11, 12, 17, 29, 30, 31, 32, 33, 34 – вентили; 13, 14 – клапаны; 15 – задвижка; 16, 22, 23, 24 – вентили вакуумные; 18 – вакуумопровод; 19 – ЖРДМТ; 20 – камера вакуумная; 21 – задвижка; 25, 26 – емкости нейтрализационные; 27 – фильтр; 28 – бак конденсатный; 35 – насос механический

Промывочная вода из шкафа 7 окислителя через вентиль 12 поступает в фильтр 27, заполненный нейтрализующим веществом. Нейтрализованная вода сливается через вентиль 34.

При наземных испытаниях вакуумный вентиль 17 открыт, а весь воздухообмен в боксе идет через вакуумную камеру. При этом обеспечивается разбавление продуктов сгорания большим количеством воздуха и снижение их температуры до приемлемой для вентилятора. Вакуумная камера в этом случае сообщается через задвижку 15 с системой вентиляции, а магистрали для вакуумирования перекрываются.

Вакуумная система, состоящая из группы механических насосов 35, позволяет откачать воздух из вакуумной камеры до минимального давления 6...7 Па за 5...6 мин. Поскольку насосы не предназначены для откачки агрессивных сред, они отсоединяются от камеры вакуумным вентилем 16 после достижения в ней необходимого давления.

Эвакуация продуктов сгорания ЖРДМТ, работающего при низком давлении окружающей среды в непрерывном или длительном импульсном режиме, осуществляется пароэжекторным насосом. Газы к насосу поступают по вакуумопроводу 18 и охлаждаются до температуры +50 °С в теплообменнике 10. Пароэжекторный насос имеет четыре последовательно работающие ступени – 5, 4, 2, 8. После второй, третьей и четвертой ступеней насоса установлены кожухотрубчатые конденсаторы 3, 1 и 9, из которых конденсат собирается через вакуумные вентили 24, 23 и 22 в конденсатном баке 28, имеющем соответственно три герметичных отсека. Несконденсировавшаяся смесь продуктов сгорания и пара уходит в систему вентиляции, которая при необходимости может быть оборудована дожигателем.

Топливная система стенда позволяет производить заправку компонентами магистралей стенда и полостей головки камеры ЖРДМТ, подачу компонентов топлива в ЖРД, очистку компонентов от газовых пузырей, отбор образцов топлива для анализа, фильтрацию компонентов топлива, заправку расходного бака во время работы ЖРД и слив топлива из баков в емкости топливохранилища после завершения испытания.

На стенде (рис.8.11) управление работой однотипных систем питания ЖРДМТ горючим (на схеме справа) и окислителем осуществляется с пульта. В системах использованы отсечные пневмогидроклапаны, срабатывание которых осуществляется при подаче сжатого воздуха от электропневмоклапанов. Каждая система имеет бак 9 для хранения на стенде необходимого запаса компонента и небольшой расходный бачок 7 с уровнемером-расходомером 8. Для наддува баков в системе хранения и подачи горючего используется газообразный азот, а для баков

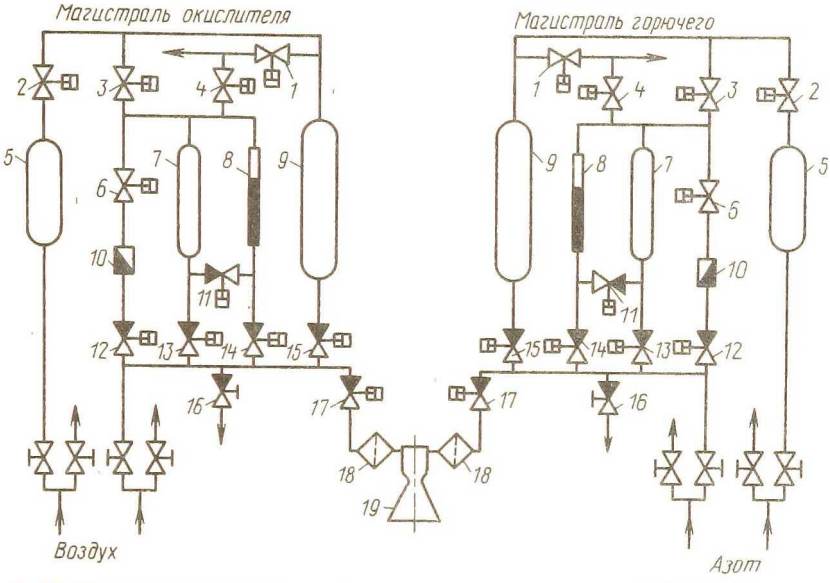


Рис. 8.11. Пневмогидравлическая схема стенда для испытаний ЖРДМТ: 1, 2, 3, 4, 6, 11, 12, 13, 14, 15, 17 — пневмогидроклапаны; 5 — ресивер; 7 — бачок расходный; 8 — уровнемер-расходомер; 9 — бак; 10 — расходомер; 16 — вентиль ручной; 18 — фильтр; 19 — ЖРДМТ; ⋈, ⋈ — пневмогидроклапаны и вентили, работающие на жидкости и газе соответственно

системы окислителя — сжатый воздух из компрессорной. Воздух является также рабочим телом системы автоматики стенда и используется для выполнения вспомогательных технологических работ.

Требуемые давления наддува в топливной системе устанавливаются с помощью редукторов, расположенных на пульте управления. Контроль давлений осуществляется по манометрам, находящимся на щитке перед оператором. Для поддержания постоянного давления наддува компонентов обе системы имеют ресиверы 5. Уменьшение давления в полостях над жидкими компонентами осуществляется посредством открытия дренажных пневмогидроклапанов 1 и 4.

Заправки емкостей компонентами топлива и перекачка их из одних емкостей в другие осуществляется с помощью пневмогидроклапанов 1, 2, 3, 4, 11, 13, 14, 15. Ручные вентили 16 служат для подсоединения к стенду внешних топливных емкостей при заправке баков стенда или при полном сливе из них компонентов. Пневмогидроклапаны 6 и 12 обеспечивают работу сильфонных расходомеров 10. Пневмогидроклапаны

17 расположены в непосредственной близости к ЖРДМТ 19 (вне магистралей горючего и окислителя) и выполняют функции отсечных стендовых клапанов. В каждой из топливных магистралей предусмотрены также фильтры 18.

Для контроля за работой пневмогидроклапанов на пульте выполнена мнемосхема, аналогичная приведенной на рис.8.11, при срабатывании того или иного пневмогидроклапана загорается сигнальная лампочка.

Иногда необходима вакуумная заправка топливных магистралей, уровнемеров и полостей головки камеры ЖРДМТ компонентами топлива. Для этого предусмотрены специальные краны, которые открываются перед заправкой и соединяют топливные полости с системой вакуумирования. После вакуумирования указанных полостей процесс заправки осуществляется одновременно обоими компонентами под низким давлением при открытых клапанах ЖРДМТ. Заправка прекращается после наступления устойчивой огневой работы ЖРДМТ.

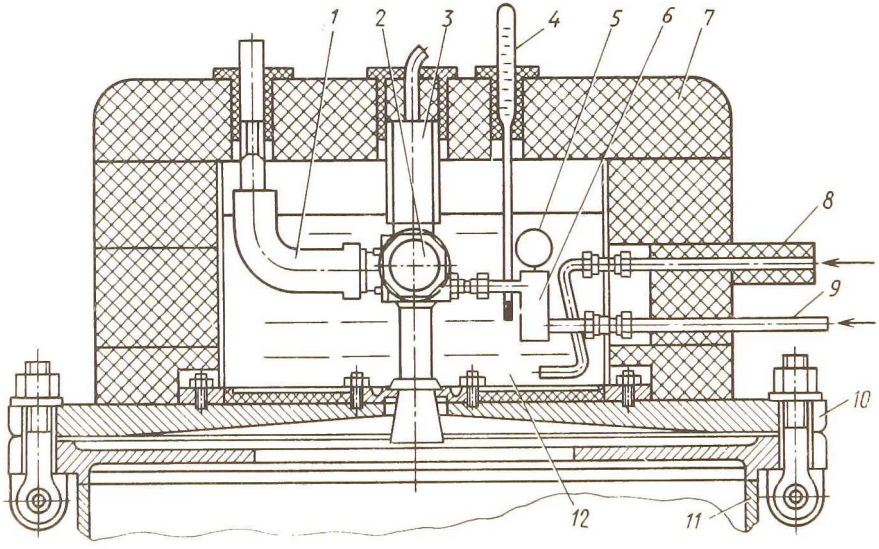


Рис. 8.12. Устройство для термостатирования компонентов топлива и ЖРДМТ:

1 — преобразователь давления первичный; 2 — ЖРДМТ; 3 — разъем штепсельный; 4 — термометр ртутный; 5 — преобразователь температуры первичный; 6 — бачок топливный; 7 — контейнер; 8 — канал подвода жидкого азота; 9 — канал подвода топлива; 10 — фланец съемный; 11 — камера вакуумная; 12 — спирт (вода)

На стенде в некоторых случаях предусматривается возможность термостатирования компонентов топлива и ЖРДМТ. Методы термостатирования могут быть самые разные. Один из них, достаточно простой, может быть осуществлен с помощью устройства, показанного на рис.8.12. ЖРДМТ с герметизированными выводами от штепсельного разъема и первичных преобразователей давления и температуры крепится на съемном фланце вакуумной камеры внутри теплоизолированного контейнера. Там же расположены дополнительные топливные бачки. При захолаживании контейнер заливается до определенного уровня спиртом и по специальному трубопроводу, конец которого введен внутрь контейнера, в спирт вдувается жидкий азот. Такая схема обеспечивает быстрое и равномерное охлаждение предварительно заправленного ЖРДМТ и топливных магистралей. Регулированием подачи жидкого азота устройство позволяет выдерживать заданную температуру в пределах $\pm 1^{\circ}$C при охлаждении топлива и ЖРДМТ до -50° C.

Для проведения испытаний при положительных температурах (до $+50^{\circ}$C) контейнер заливается водой, которая подогревается электрическим нагревателем. Температура спирта или воды измеряется ртутным термометром, а температура компонентов – хромель-копелевыми термопарами.

Стенды оборудуются также системами управления, измерения и регистрации параметров.

8.3.3. Маятниковые стенды

Известно, что для ЖРДМТ систем управления КЛА один из основных режимов работы – импульсный. Поэтому исследованию работы ЖРДМТ в этом режиме и определению основных его параметров придают особое значение. Основными определяемыми параметрами являются единичный импульс тяги (импульс тяги за одно включение) и удельный импульс тяги (отношение импульса тяги за одно включение к массе топлива, израсходованного за это включение). Указанные параметры зачастую определяют расчетно-экспериментальными методами с использованием осциллограмм давления в камере сгорания и в топливных магистралях ЖРДМТ, однако более точным является определение их прямыми измерениями.

Измерить единичный импульс тяги можно несколькими путями, но наибольшее распространение получил способ его определения на маятниковом стенде (рис.8.13). Основой стенда является вакуумная камера 3, в которой размещен маятник 2 с испытуемым газовым дви-

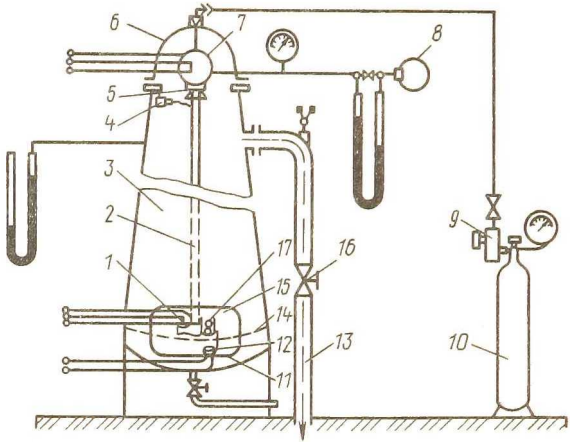


Рис. 8.13. Схема маятникового стенда для испытаний газового ракетного двигателя в импульсных режимах работы:
1 — двигатель; 2 — маятник; 3 — камера вакуумная; 4 — устройство электромагнитное; 5 — опора; 6 — крышка верхняя; 7 — бак расходный; 8 — бак вспомогательный; 9 — редуктор давления; 10 — баллон; 11 — фотодиод; 12 — решетка; 13 — трубопровод; 14 — решетка неподвижная; 15 — люк смотровой; 16 — задвижка вакуумная; 17 — осветитель

гателем 1 и другие устройства. Вакуумная камера выполнена в форме усеченного конуса с полусферическими днищами. Для удобства монтажа приборов и смены маятника верхняя крышка 6 выполнена съемной. Для визуального наблюдения за движением маятника в нижней части камеры предусмотрен большой смотровой люк 15, закрытый стеклом.

Для опрессовки камеры, а также для удаления отработавшего газа имеются системы наддува и дренажа. Трубопровод 13, на котором установлена вакуумная задвижка 16, связывает камеру с вакуумными насосами. На верхней обечайке установлены ножевые призмы – опоры 5 маятника и электромагнитное устройство 4 для раскачки маятника. Обычно изготовляют комплект из нескольких маятников, каждый из которых рассчитывают для испытания двигателей в определенном диапазоне тяг. Устройство для измерения импульса тяги для всех маятников одно и то же.

На одном кронштейне с двигателем закреплены осветитель 17, дающий узкий параллельный пучок света, и решетка 12 с прозрачными и

непрозрачными полосами (ширина каждой полосы 0,2 мм), наклеенная на фотодиод 11. Между осветителем 17 и фотодиодом расположена неподвижная решетка 14, изогнутая по дуге радиусом, равным расстоянию от оси маятника до неподвижной решетки. Световой поток от осветителя проходит неподвижную решетку и попадает на подвижную решетку, наклеенную на фотодиод. При попадании переменного светового потока на фотодиод в цепи фотодиода меняется сила тока, которая регистрируется на осциллограмме в виде волнообразной линии. Каждая волна линии соответствует прохождению одного деления шкалы неподвижной решетки.

Специальным электромагнитным устройством маятник раскачивается и начинает совершать свободные гармонические колебания с амплитудой φ. В момент прохождения маятником положения устойчивого равновесия подается сигнал на включение электромагнитного клапана двигателя. При открытии клапана газ из расходного бака 7 по трубе подается в сопловую камеру двигателя и через сопло истекает в вакуумную камеру. Этот момент характеризуется уменьшением давления в расходном баке и увеличением давления в сопловой камере, что регистрируется на осциллограмме (рис.8.14).

После сообщения маятнику импульса скорость его движения и амплитуда его колебаний увеличиваются.

После преобразования уравнения движения маятника

$$J_{м} \frac{d^2\varphi}{d\tau^2} = Pl_{р} - m_{м} l_{м} \sin\varphi, \qquad (8.9)$$

где $J_{м}$ – момент инерции маятника с двигателем; $\frac{d^2\varphi}{d\tau^2}$ – угловое ускорение маятника; P – тяга; $l_{р}$ – радиус траектории движения двига-

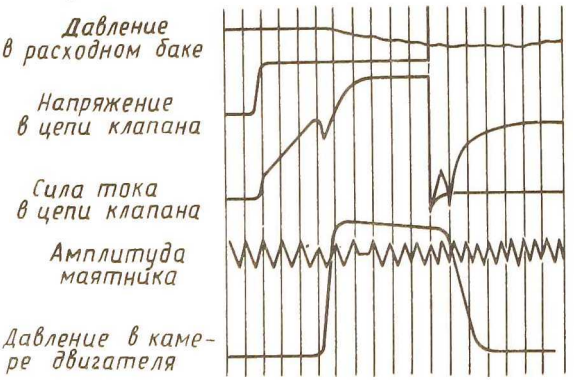


Рис.8.14. Осциллограмма записи параметров газового ракетного двигателя при испытании на маятниковом стенде

теля с маятником; $m_м$ – масса маятника; $l_м$ – радиус траектории движения центра масс маятника, получают формулу для определения тяги

$$P = \frac{J_м \frac{d^2\varphi}{d\tau^2} + m_м l_м \sin\varphi}{l_р}. \qquad (8.10)$$

Момент инерции маятника определяют путем покачивания с малой амплитудой и вычисляют по формуле

$$J_м = \frac{T^2}{4\pi^2} m_м l_м, \qquad (8.11)$$

где T – период полного колебания.

Угловое ускорение определяют методом графического дифференцирования зависимости угла отклонения от времени.

Следует отметить, что при проведении испытаний на маятниковом стенде определяют не мгновенный, а суммарный расход рабочего тела за импульс. При исследовании газовых двигателей малые погрешности в измерении расхода (±1 %) обеспечиваются при использовании методов непосредственного взвешивания емкости с газом либо при оценке параметров газа, заключенного в расходном 7 и вспомогательном 8 баках до и после работы двигателя (см. рис.8.13). Заправка баков 7 и 8 производится из баллона 10 через редуктор давления 9, так что параметры газа в них до начала испытания одинаковы.

При испытаниях ЖРДМТ расход топлива можно измерять сильфонным первичным преобразователем с индуктивным измерителем перемещения сильфона и с записью перемещения на осциллограмме. Точность измерения расхода зависит в основном от точности измерения перемещения сильфона. Относительная погрешность при этом 4 %. При очень малых расходах тягу и расход топлива определяют как среднее значение за серию импульсов.

Управление испытанием полностью автоматизировано, так что запуск ЖРДМТ происходит без вмешательства экспериментатора в момент прохождения маятником положения устойчивого равновесия.

Контрольные вопросы

1. В каких импульсных режимах работают ЖРДМТ и какие характеристики для них являются определяющими и подлежат экспериментальной оценке?

2. Какие экспериментальные исследования специфичны при разработке нового ЖРДМТ?

3. Каковы особенности реактивного и активного тягоизмерительных устройств ЖРДМТ?

4. Какие трудности возникают при измерении расхода компонентов топлива ЖРДМТ в импульсном режиме работы и как их преодолевают?

5. Какими методами обеспечивается имитация высотных условий при испытаниях ЖРДМТ?

6. Каким методом можно наиболее точно оценить единичный и удельный импульсы тяги ЖРДМТ за один запуск и в чем заключается этот метод?

Глава 9
МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЙ

9.1. МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЖРД

Моделирование как метод решения многих сложных задач создания надежных и эффективных систем нашло широкое применение в различных отраслях техники. Различные аспекты создания моделей явлений или моделей функционирования технических систем достаточно полно освещены в специальной литературе. Остановимся на применении методов моделирования ЖРД и определения их характеристик в процессе опытной отработки.

Как известно, испытание современного ЖРД связано со значительными материальными затратами. Подтвердить надежность как самого ЖРД, так и ракеты или КЛА, на которых он устанавливается и будет функционировать, можно получая разнообразную информацию о характеристиках ЖРД, оценивающих точность достижения основных параметров, напряженность состояния элементов конструкции, качество динамических процессов и т.д.

Для того, чтобы свести к минимуму число натурных огневых испытаний в процессе опытной отработки ЖРД, широко используют различные методы моделирования.

Методы аналитического моделирования позволяют описать процессы в ДУ математическими зависимостями или найти математическую структуру (в виде, например, оператора), которая связывает функционально варьируемые факторы с тем или иным множеством интересующих выходных параметров. Таким образом формируется система алгебраических или дифференциальных уравнений относительно входных или выходных величин. В этом случае необходимо проведение операций по рационализации структур этих математических совокупностей. Так, следует определить минимально необходимое число учитываемых факторов, чтобы избежать чрезмерного усложнения модели, правильно выявить характер связей между параметрами, провести операции по возможной линеаризации зависимостей и т.д. Важно также правильно назначить границы, в которых модель

обеспечивает заданную точность получаемых решений. Следует широко использовать экспериментальные данные по испытаниям отдельных агрегатов и изучению процесса на двигателях-прототипах. Это позволяет избежать грубых промахов или чрезмерного усложнения при моделировании.

Однако даже эти приемы не всегда эффективны при составлении аналитической модели, особенно для ЖРД, в котором заложены новые технические решения. Учесть расчетным путем все факторы, оказывающие существенное влияние на выходные параметры ЖРД, практически невозможно. Да и погрешность их априорного определения весьма значительна. Например, трудно прогнозировать КПД насосов и турбины, потери давления в трактах ЖРД, кавитационные свойства насосов, время запаздывания в газогенераторе и камере. Некоторые факторы вообще не имеют количественных оценок (например, объемы кавитационных каверн во входных устройствах насосов). Все это в значительной мере снижает информативность аналитических моделей на первой стадии их формирования и делает необходимым их дальнейшее совершенствование. Таким образом, эти модели на начальном этапе формирования можно использовать для качественных оценок. А методы теории чувствительности позволяют путем проведения серий вариантных расчетов определить, на какие факторы исследователь должен обратить особое внимание при эксперименте. Их уточнение уменьшает погрешность расчетов.

И, наконец, отметим, что аналитическое моделирование позволяет создать как детерминированные, так и стохастические (вероятностные) модели. Стохастические модели находят широкое применение при решении задач исследования динамических процессов в ЖРД, а также при разработке средств технического диагностирования.

Методы физического моделирования позволяют провести испытания на моделях отдельных узлов или систем ЖРД, построенных на основе равенства соответствующих критериев подобия процессов и параметров модели и объекта испытания, или на моделях лишь граничных условий в местах стыковки исследуемой системы с другими узлами ЖРД. Работа на физической модели – это эксперимент в условиях, максимально приближенных к условиям испытания объекта. Методы физического моделирования получили широкое распространение при автономной отработке отдельных агрегатов ЖРД: ТНА, регуляторов, элементов системы управления.

Комбинированные методы моделирования, обусловленные высокими требованиями по точности полу-

чаемой информации при модельных исследованиях и нашедшие наиболее широкое применение при отработке ЖРД, позволяют создать экспериментально-аналитические модели, основанные на использовании опытных данных, полученных при серийных или при целевых испытаниях.

На основании экспериментальной информации уточняются или вводятся ранее неизвестные связи в структуру исходной аналитической модели ЖРД.

С другой стороны комбинированные методы моделирования позволяют использовать в структуре модели как математический аналог какой-то части системы, так и реальные ее составляющие. Например, для отработки контура регулирования ЖРД можно составить такую комбинированную структуру: математическая модель ЖРД, реализованная на аналоговой вычислительной машине, реальная система контроля давления в камере, реальный контур регулятора кажущейся скорости или автомата стабилизации, реальный привод регулятора тяги.

Учитывая назначение методов моделирования, надо иметь в виду, что все-таки конечной целью всех операций должно быть создание достаточно адекватной аналитической модели ЖРД. Кроме решения чисто двигательных задач, это необходимо и для проведения расчетных исследований для оценки свойств ракетной системы или КЛА, в которых ЖРД является одним из важнейших элементов.

9.2. ПРИНЦИПЫ СОСТАВЛЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ

Последовательность операций по созданию комбинированной модели или экспериментально-аналитической модели, достаточно точно отражающей свойства объекта испытания, ясна из структурной схемы, приведенной на рис.9.1. Верхняя часть схемы реализует аналитическое моделирование, нижняя – обеспечивает получение необходимой экспериментальной информации для уточнения аналитической модели. Такое уточнение обычно касается характеристик и параметров, зависящих от конструктивных и режимных факторов конкретной схемы ЖРД, таких как КПД насосов и турбины, время преобразования компонентов топлива в энергоузлах, приведенная скорость распространения звука в топливных магистралях, коэффициенты в уравнениях движения регулирующих органов и ротора ТНА и т.д. Подобное уточнение исходной аналитической модели принято называть операцией коррекции. Естественно, что она может выполняться до тех пор, пока не будет достигнута заданная степень адекватности.

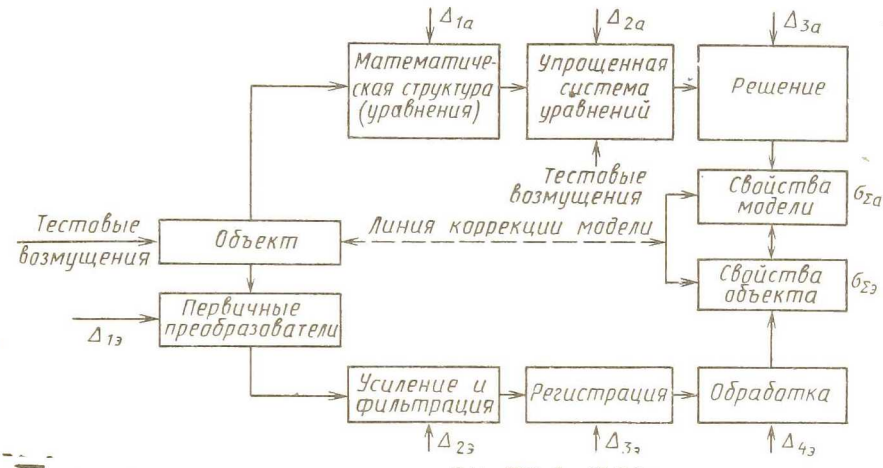


Рис. 9.1. Структурная схема комбинированного моделирования

Структура комбинированного моделирования может быть использована для составления моделей как статических, так и динамических свойств ЖРД. Анализ пневмогидравлической схемы ЖРД и результаты термодинамического, газодинамического и энергетического расчетов позволяют составить математическую структуру, описывающую взаимосвязь между параметрами ЖРД. В зависимости от решаемой задачи они могут быть выражены алгебраическими уравнениями (для анализа статических свойств) или системами дифференциальных уравнений в относительных или абсолютных приращениях параметров (для анализа динамических характеристик ЖРД).

Как отмечалось, на этом этапе исследователь имеет ограниченный объем информации, т.е. некоторые зависимости или неизвестны вообще, или определены качественно. В связи с этим уже на первом этапе моделирования вносится погрешность Δ_{1a}, которая связана еще и со схематизацией реальных явлений, с введением определенных допущений, а иногда и неучетом некоторых факторов и связей. Эта погрешность моделирования в большинстве случаев является превалирующей, и последующие операции коррекции исходной аналитической модели касаются уточнений именно в этой части.

Следующий этап создания аналитической модели связан с проведением операций по упрощению исходной математической структуры, так как в большинстве случаев полученная нелинейная система уравнений довольно высокого порядка трудно поддается решению. В связи с этим упрощение исходной структуры обычно состоит в линеаризации уравне-

ний. Это также вносит погрешность Δ_{2a}, существенно уменьшить которую можно путем совершенствования методов вычислений.

В результате выполнения описанных операций фактически получается аналитическая модель объекта, исследование которой может быть проведено в области времени или частоты для определения интересующих характеристик ЖРД. При этом достаточно один из параметров модели, представляющих в данном случае действующее входное возмущение, задать в виде соответствующего тестового отклонения. Для расчета статических характеристик обычно используют ЭВМ, а для определения динамических свойств (переходных и частотных характеристик) – ЭВМ и АВМ.

Для динамических расчетов возможно также построение электрических моделей, основанных на использовании принципов электродинамических аналогий. Получаемая информация в зависимости от применяемого вычислительного устройства, а также алгоритма решения, способа его представления характеризуется еще одной погрешностью Δ_{3a}.

Так как факторы, обусловливающие состав погрешностей Δ_{1a}, Δ_{2a}, Δ_{3a}, практически некоррелированы и содержат множество компонент, то

$$\sigma_{\Sigma a} = \sqrt{\Delta_{1a}^2 + \Delta_{2a}^2 + \Delta_{3a}^2}, \qquad (9.1)$$

где $\sigma_{\Sigma a}$ – суммарная средняя квадратическая погрешность исходной аналитической модели.

Получение необходимой экспериментальной информации для уточнения исходной аналитической модели, уменьшения $\sigma_{\Sigma a}$ связано с проведением испытаний ЖРД и отдельных его агрегатов. Очевидно, что в этом случае получаемые экспериментальные оценки также обладают конечной точностью. Составляющие погрешности экспериментальной оценки связаны с искажениями информации: первичным преобразователем $\Delta_{1э}$, в тракте преобразования сигнала усилительным устройством и фильтром $\Delta_{2э}$, при регистрации $\Delta_{3э}$, обработке на вычислительном устройстве $\Delta_{4э}$. Таким образом, суммарная погрешность экспериментальных характеристик

$$\sigma_{\Sigma э} = \sqrt{\Delta^2_{1э} + \Delta^2_{2э} + \Delta^2_{3э} + \Delta^2_{4э}}. \qquad (9.2)$$

Следует отметить, что для каждого конкретного случая экспериментальной оценки надо дифференцированно воспринимать рассчитанную погрешность $\sigma_{\Sigma э}$. Иногда она должна быть очень незначительной и составлять лишь десятые доли процента, например при измерении установившихся значений давления в камере, расходов компонентов топлива. При экспериментальном же определении частотных характеристик ЖРД $\sigma_{\Sigma э}$ может достигать десятков процентов и быть вполне приемлемой. Вообще, в каждом конкретном решении задачи о необходимой точности экспериментальной информации надо проводить тщательный анализ с учетом основных характеристик ЖРД и тех трудностей, которые связаны с минимизацией погрешности измерения параметров в условиях испытаний ЖРД.

Конечно, при каждом испытании необходимо тщательно анализировать метрологические свойства тракта получения экспериментальной информации и стремиться свести значение $\sigma_{\Sigma э}$ к рациональному минимуму. В снижении $\sigma_{\Sigma э}$, кроме увеличения точности измерительного канала, большое значение имеет оптимизация алгоритмов обработки информации. Современные ЭВМ имеют достаточное математическое обеспечение, позволяющее выбрать рациональный алгоритм обработки полученной первичной экспериментальной информации практически для любой задачи идентификации свойств двигателя. Из наиболее распространенных в практике испытаний ЖРД или его элементов можно отметить алгоритмы осреднения параметров, приведения выходных параметров ЖРД к номинальным внешним факторам, оценки точности настройки ЖРД на заданный режим, гармонического и спектрального анализа.

Полученная экспериментальная информация дает возможность провести операции коррекции исходной аналитической модели ЖРД и добиться получения статических характеристик с $\sigma_{\Sigma a} = 0{,}1...0{,}5$ % и динамических – с $\sigma_{\Sigma a} = 5...30$ %. Это позволяет считать аналитические модели практически адекватными объекту и использовать их для получения необходимой информации о свойствах ЖРД. Описанный комбинированный метод моделирования широко распространен в практике созда-

ния ЖРД. Этим методом достаточно эффективно решают задачи определения разброса статических характеристик в зависимости от воздействия внешних и внутренних возмущающих факторов, задачи построения рациональных САЗ, идентификации аварий и т.д.

9.3. МОДЕЛИ СТАТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБЪЕКТА ИСПЫТАНИЙ

Математические модели статических свойств ЖРД необходимы для оценки влияния внешних и внутренних факторов на основные его параметры – давление в камере, соотношение компонентов топлива, тягу, удельный импульс тяги. В некоторых случаях представляет интерес оценка влияния внешних и внутренних факторов на такие характеристики ЖРД, как КПД насосов и турбины ТНА, температура генераторного газа и т.д.

Из большого числа внешних факторов, воздействующих на параметры ЖРД, обычно учитывают наиболее существенные, такие как изменение давления окружающей среды, изменение давлений и температур компонентов топлива на входе ЖРД, изменение положения органов регулирования.

Наиболее употребимыми для аппроксимации связей параметров ЖРД с возмущающими факторами являются:

линейная зависимость вида

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \ldots + b_n x_n + \epsilon_k, \tag{9.3}$$

полином вида

$$y = \sum_{i=1}^{n} b_i x_i + \sum_{i=1}^{n} b_{ij} x_i x_j + \epsilon_q, \tag{9.4}$$

где y – искомый параметр; b_0 – математическое ожидание параметра; b_i, b_{ij} – коэффициенты влияния (регрессии); x_i, x_j – варьируемые факторы; ϵ – погрешность аппроксимации.

Основная задача моделирования сводится к определению коэффициентов b_i, b_{ij}, которые находят расчетным путем и уточняют путем статистической обработки результатов испытаний. Их стабильность определяется в основном технологическим совершенством процесса из-

готовления узлов и агрегатов ЖРД. Как правило, именно значительный технологический разброс, а также неучет ряда взаимодействий между факторами и приводят к увеличению составляющих погрешностей ϵ в выражениях (9.3) и (9.4).

На практике для моделирования статических свойств ЖРД обычно используют системы алгебраических уравнений, составленные при допущении о независимости b_n, x_n, т.е. в предположении о выполнении для этой системы принципа суперпозиции.

Если характеристики ЖРД нелинейные, то проводят операцию по их линеаризации в ограниченном диапазоне изменения фактора x_n, при этом для каждого из поддиапазонов рассматриваемого изменения фактора x_n определяют свое значение коэффициента b_n. В результате операций по линеаризации получают

$$\Delta y = \frac{dy}{dx_1}(x_1 - \bar{x}_1) + \ldots + \frac{dy}{dx_n}(x_n - \bar{x}_n). \qquad (9.5)$$

Здесь $\bar{x}_1$ – номинальное значение параметра x_1 в точке линеаризации.

Тогда

$$\Delta y = \sum_{i=1}^{n} \frac{dy}{dx_{i1}} \Delta x_i, \qquad (9.6)$$

где

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}_i,$$

а погрешность определяется формулой

$$\epsilon_y \leqslant \sum_{i=1}^{n} \left| \frac{dy}{dx_i} \right| |\Delta x_i|. \qquad (9.7)$$

Обозначим $\frac{dy}{dx_i}$ через a_i.

В результате

$$\delta y = \Sigma a_i \delta x,$$

где δy – вариация параметра рабочего процесса; δx – вариация возмущающего фактора.

В этом случае модель ЖРД описывается системой алгебраических уравнений.

Исходными данными для получения статических характеристик являются: схема ЖРД и номинальные значения параметров, состав и характеристики возмущающих факторов, полученные уравнения агрегатов.

В результате решают систему уравнений вида

$$\sum_{i=1}^{N} a_{ji}\delta y_i = \sum_{k=1}^{M} b_{jk}\delta x_k, \qquad (9.8)$$

где $j = 1,\ldots,L$ – номер уравнения; $i = 1,\ldots,N$ – номер параметра; $k = 1,\ldots,M$ – номер фактора.

В матричной форме система уравнений (9.8) имеет вид

$$\mathbf{A}|\delta y| = \mathbf{B}|\delta x|, \qquad (9.9)$$

где

$$\mathrm{A} = \begin{vmatrix} a_{11}a_{12}\ldots a_{1N} \\ a_{21}a_{22}\ldots a_{2N} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots \\ a_{L1}a_{L2}\ldots a_{LN} \end{vmatrix}; \qquad \mathrm{B} = \begin{vmatrix} b_{11}b_{12}\ldots b_{1M} \\ b_{21}b_{22}\ldots b_{2M} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots \\ b_{L1}b_{L2}\ldots b_{LM} \end{vmatrix};$$

$$\delta\mathrm{y} = \begin{vmatrix} \delta y_1 \\ \delta y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \delta y_N \end{vmatrix}; \qquad \delta\mathrm{x} = \begin{vmatrix} \delta x_1 \\ \delta x_2 \\ \cdot \\ \\ \delta x_M \end{vmatrix}.$$

Уравнение (9.9) разрешается относительно любой характеристики:

$$|\delta\mathrm{y}| = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}|\delta\mathrm{x}|.$$

Матрица **A** формируется как квадратичная, т.е. $L = N$. В этом случае

$$\delta y_i = \sum_{k=1}^{M} C_{ik}\delta x_k,$$

где C_{ik} – коэффициент влияния возмущения x_k на параметр ЖРД y_i, определяемый формулой

$$C_{ik} = \Delta_{ik}/\Delta;$$

Δ – определитель матрицы **A**; Δ_{ik} – дополнительный определитель, полученный подстановкой в матрицу **A** вместо столбца, соответствующего параметру y_i, столбца из матрицы **B**, соответствующего возмущению x_k.

Основная задача испытаний ЖРД, направленных на определение статических свойств, – уточнение коэффициентов влияния в условиях функционирующего ЖРД. Этому способствует реализация специально спланированных факторных экспериментов. Коэффициенты влияния в процессе доводки ЖРД и его непрерывного совершенствования могут изменяться, поэтому необходим контроль их стабильности, который осуществляется путем статистической обработки результатов серий испытаний ЖРД.

При исследовании статических свойств ЖРД получают, кроме собственно характеристик (дроссельной, высотной), табулированные результаты влияния отклонений внешних и внутренних факторов на выходные, оценочные параметры ЖРД.

9.4. ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЖРД

9.4.1. Основные характеристики

Моделирование динамических процессов занимает особо важное место в создании ЖРД. Прежде всего, это связано с малым временем работы ЖРД, которое обусловливает значительные скорости развития процессов в его узлах, с наличием большого числа связей между его контурами, а также с необходимостью тщательного исследования его динамических характеристик для обеспечения устойчивости как самого ЖРД, так и системы ракета–ЖРД. Большое значение моделирование динамических процессов имеет и для решения задач технического диагностирования ЖРД, идентификации аномалий в их работе.

Наличие большого числа факторов, влияющих на динамические характеристики отдельных агрегатов и ЖРД в целом, обусловливает необходимость проведения многочисленных экспериментальных и расчет-

ных работ с целью определения разброса динамических характеристик, выбора путей их эффективной коррекции для увеличения запаса устойчивости или получения заданного качества переходных процессов. В связи с этим создание адекватной динамической модели ЖРД является весьма актуальной задачей при его отработке.

Стремление разработчиков создать ЖРД, обладающий высокой надежностью, расширяет традиционные задачи, решаемые с помощью моделей. Так, в последнее время широко развиваются методы идентификации аварийных исходов испытаний с помощью моделирования, методы локализации источников нестационарности процессов, выбора с помощью модельных расчетов параметров ЖРД, обладающих наибольшей чувствительностью к возможным неисправностям систем КЛА и самого ЖРД. Получаемая при этом информация позволяет разработать эффективную автоматическую аварийную защиту.

Для решения поставленных задач используют как локальные, так и обобщенные динамические модели. Локальные модели применяют для анализа и синтеза динамических свойств отдельных агрегатов ЖРД с целью определения факторов, влияющих на устойчивость процессов в них, или поиска конструктивных и параметрических путей обеспечения динамического качества. Обобщенные модели служат для исследования динамики всей структуры ЖРД. Их используют при анализе переходных процессов и определении частотных характеристик ЖРД по различным каналам внесения возмущений. В зависимости от принятых при составлении динамической модели допущений определяют диапазоны времени и частот, в которых она обладает достаточной адекватностью. В практике создания ЖРД наиболее распространены низкочастотные модели с разрешенными временами процессов до 0,02 с и с частотным диапазоном до 50 Гц.

Используя описанные принципы составления комбинированных экспериментально-аналитических моделей, структуру ЖРД, включающую агрегаты и связи между ними, можно представить в виде совокупности дифференциальных уравнений движения (записанных обычно в операторной форме), которые могут быть решены во временной или в частотной областях. За основу составления и решения уравнений могут быть приняты методы теории автоматического регулирования [6, 7].



Рис. 9.2. Схема участка трубопровода

Большое значение здесь имеет правильный, рациональный выбор исходной модели. Даже для такого простого элемента, как трубопровод, могут быть различные варианты. Рассмотрим их, исходя из схемы участка трубопровода (рис.9.2).

Приняв в качестве первого приближения, что трубопровод не обладает ни инерцией, ни емкостными свойствами, его можно представить в виде гидравлического сопротивления. Тогда

$$\dot{m} = \mu F \sqrt{2(p_1 - p_2)\rho}, \qquad (9.10)$$

где μ – коэффициент расхода; F – площадь сечения трубопровода; ρ – плотность жидкости.

После линеаризации выражения (9.10) получим

$$\delta\dot{m} = \frac{\dot{m}}{2\Delta p}\,\delta\Delta p.$$

Здесь $\dot{m}$ – массовый расход жидкости. Таким образом, в этом случае трубопровод аппроксимируется статическим усилительным звеном.

Для учета инерции необходимо записать уравнение движения жидкости на выделенном участке трубопровода. При этом принимают, что движение жидкости одномерное, жидкость несжимаема, стенки трубопровода абсолютно жесткие и учитывают давление с торцевых поверхностей, силу инерции столба жидкости и силу трения по боковой поверхности:

$$m\frac{dW}{d\tau} = p_1 F - p_2 F - F_{тр}. \qquad (9.11)$$

Здесь $m = \rho l F$ – масса на участке длиной l; W – скорость жидкости, связанная с ее массовым расходом соотношением $W = m/(F\rho)$; $F_{тр} = K_{тр}\dot{m}$ – сила трения; $K_{тр}$ – коэффициент трения.

После преобразования получаем

$$L\frac{d\dot{m}}{d\tau} + R\dot{m} = p_1 - p_2, \qquad (9.12)$$

где $L = l/F$ – величина, характеризующая инерцию; $R = K_{тр}/F$ – коэффициент гидравлического сопротивления.

В операторной форме последнее уравнение запишется в виде

$$(Ts + 1)\delta\tilde{\dot{m}} = K\delta\tilde{\Delta p},$$

где $T = L/R$; s – оператор Лапласа $K = 1/R$; "~" здесь и далее обозначает изображение по Лапласу.

Как видно, в этом случае трубопровод представляет собой апериодическое звено.

В ряде случаев необходимо учитывать емкостное свойство рассматриваемого участка трубопровода, обусловленное податливостью его стенок и сжимаемостью жидкости. Тогда к уравнению движения жидкости добавляют уравнение участка трубопровода как емкости

$$\dot{m}_1 - \dot{m}_2 = l \frac{d(\rho F)}{d\tau} .$$

Так как

$$\rho = \rho_{ном}\left\{1 + \frac{p - p_{ном}}{E_ж}\right\},$$

где $p = (p_1 + p_2)/2$ – среднее давление на участке; $\rho_{ном}$ – плотность жидкости при номинальном давлении $p_{ном}$; $E_ж$ – модуль объемного сжатия жидкости,

$$F = F_0\left\{1 + a \frac{p - p_{ном}}{E_м}\right\},$$

где F_0 – площадь сечения трубопровода при $p_{ном}$; $E_м$ – модуль упругости материала трубопровода; a – коэффициент, учитывающий форму и размеры трубопровода.

Используя приближенное равенство

$$\rho F \approx \frac{\rho_{ном} F_0}{K_{пр}} (p - p_{ном}),$$

где $K_{пр} = E_ж/(1 + aE_ж/E_м)$ – приведенный модуль упругости системы трубопровод – жидкость, можно получить выражение

$$\dot{m}_1 - \dot{m}_2 = \frac{l \rho_{ном} F_0}{K_{пр}} \frac{dp}{d\tau}$$

или

$$\dot{m}_1 - \dot{m}_2 = C \frac{dp}{d\tau} ,$$

где $C = V/a^2$ – коэффициент, характеризующий податливость системы трубопровод – жидкость; $V = lF_0$ – объем участка трубопровода; $a = \sqrt{K_{пр}/\rho}$ – скорость звука в системе.

Таким образом, движение жидкости на каждом из конечных участков, на которые разбит весь трубопровод, описывается системой двух линейных дифференциальных уравнений

$$L\frac{d\delta\dot{m}}{d\tau} + R\delta\dot{m} = \delta p_1 - \delta p_2;$$

$$C\frac{d\delta p_2}{d\tau} = \delta\dot{m}_1 - \delta\dot{m}_2. \qquad (9.13)$$

Подставляя уравнение (9.13) в уравнение (9.12) при условии, например, $\delta\dot{m}_2 = 0$, получаем

$$LC\frac{d^2\delta p_2}{d\tau^2} + RC\frac{d\delta p_2}{d\tau} + \delta p_2 = \delta p_1 \qquad (9.14)$$

или, приняв $LC = T_2^2$ и $RC = T_1$, в операторной форме получим

$$(T_2^2 s^2 + T_1 s + 1)\tilde{\delta p}_2 = \tilde{\delta p}_1.$$

В этом случае трубопровод имеет свойства колебательного звена.

Различие свойств рассмотренных моделей наглядно иллюстрируется в частотной области (см. рис.4.2, 4.3).

В пределе, при стремлении числа конечных участков к бесконечности, трубопровод представляет собой систему, все свойства которой – инерция, сжимаемость жидкости, трение – равномерно распределены по элементарным объемам. Нестационарное движение жидкости в системе с распределенными параметрами описывается системой уравнений в частных производных

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = L\frac{\partial\dot{m}}{\partial\tau} + R\dot{m}^2; \qquad -\frac{\partial\dot{m}}{\partial x} = C\frac{\partial p}{\partial\tau}. \qquad (9.15)$$

Здесь L, R, C – параметры, относящиеся к 1 м линии.

Эта модель дает в принципе бесконечное число резонансов, величина и кратность которых зависят не только от длины трубопровода l и скорости звука a, но и от граничных условий на концах трубопровода.

Выбор той или иной модели элемента ЖРД (степени приближения к реальным свойствам объекта) зависит от характера решаемой задачи.

Конечно, при рассмотрении высокочастотных колебаний или решении задачи динамики в протяженной и разветвленной системе подачи модели наиболее сложные. А в некоторых случаях, например при определении возможности возникновения автоколебаний, они и нелинейные.

Приведем в качестве примера динамические модели двух типов ЖРД. Для ЖРД с дожиганием рассмотрим модель, составленную в малых отклонениях относительно параметров установившегося режима. Такие модели используют для расчета частотных характеристик по различным каналам возмущений, решения задач динамической коррекции, идентификации аварий, построения САЗ.

А для ЖРД с вытеснительной подачей топлива рассмотрим модель для расчета переходных процессов на участках времени запуска и останова. Такие модели используют для прогноза динамических процессов и решения задач коррекции.

В основу построения моделей положена информация о структуре ЖРД, его статических характеристиках, и сама модель представляет собой совокупность дифференциальных уравнений движения (изменения параметров) в области времени или частоты. Подробно вопросы составления уравнений движения рассмотрены в курсе автоматического регулирования и достаточно широко освещены в соответствующей литературе. Здесь приведем лишь результаты таких операций с необходимыми пояснениями. Отметим, что при составлении аналитической модели стремятся оперировать только теми переменными, которые могут быть получены путем измерения при испытаниях ЖРД. В этом случае упрощаются методы проверки модели на адекватность.

Модель ЖРД с дожиганием включает следующие уравнения:

1. Уравнение камеры сгорания

$$(T_1 s + 1)\delta\tilde{p}_к = (K_1 \delta\dot{\tilde{m}}_{о.т} + K_2 \delta\dot{\tilde{m}}_{г.к})e^{-\tau_1 s}, \qquad (9.16)$$

где $\delta\tilde{p}_к$, $\delta\dot{\tilde{m}}_{о.т}$, $\delta\dot{\tilde{m}}_{г.к}$ – изображения по Лапласу отклонений давления в камере сгорания, расхода окислительного газа через турбину и

расхода горючего в камеру; K_1, K_2 – статические коэффициенты усиления, соответствующие трактам подачи окислительного газа и горючего, определяемые по дроссельной характеристике камеры сгорания; T_1 – постоянная времени камеры – динамический коэффициент, учитывающий ее емкостные свойства; τ_1 – время преобразования компонентов топлива; s – оператор Лапласа.

2. Уравнение магистрали подвода окислительного газа из турбины в камеру

$$(T_2 s + 1)\delta\tilde{\dot{m}}_{\text{о.т}} = K_3(\delta\tilde{p}_{\text{т}} - \delta\tilde{p}_{\text{к}}), \qquad (9.17)$$

где T_2 – постоянная времени – динамический коэффициент, учитывающий инерцию тракта; K_3 – статический коэффициент усиления, определяемый по дроссельной характеристике магистрали; $\delta\tilde{p}_{\text{т}}$ – изображение по Лапласу отклонения давления газа за турбиной.

3. Уравнение турбины

$$\delta\tilde{p}_{\text{т}} = K_4\delta\tilde{p}_{\text{гг}}, \qquad (9.18)$$

где K_4 – статический коэффициент усиления; $\delta\tilde{p}_{\text{гг}}$ – изображение отклонения давления в газогенераторе.

4. Уравнение тракта подвода горючего в камеру

$$(T_3 s + 1)\delta\tilde{\dot{m}}_{\text{г.к}} = K_5(\delta\tilde{H}_{\text{н.г}} - \delta\tilde{p}_{\text{н.г}} - \delta\tilde{p}_{\text{к}}), \qquad (9.19)$$

где T_3 – динамический коэффициент, учитывающий инерционные свойства тракта; K_5 – статический коэффициент усиления; $\delta\tilde{H}_{\text{н.г}}$ и $\delta\tilde{p}_{\text{н.г}}$ – изображения отклонений напора насоса горючего и давления на входе этого насоса.

Как видим, в уравнениях тракта подачи горючего (трубопроводов, рубашки камеры) не учитываются емкостные свойства. Такое допущение для низкочастотных моделей оправдано тем, что инерционные потери в коротких трубопроводах являются превалирующими.

5. Уравнение газогенератора

$$(T_4 s + 1)\delta\tilde{p}_{гг} = (K_6 \delta\tilde{\dot{m}}_{о.гг} + K_7 \delta\tilde{\dot{m}}_{р}) e^{-\tau_2 s}, \qquad (9.20)$$

где T_4 – динамический коэффициент, учитывающий емкостные свойства объема газогенератора; K_6, K_7 – статические коэффициенты усиления, определяемые по дроссельной характеристике; $\delta\tilde{\dot{m}}_{о.гг}$ – изображение отклонения расхода окислителя в газогенератор ; $\delta\tilde{\dot{m}}_{р}$ – изображение отклонения расхода горючего после регулятора тяги; τ_2 – время преобразования компонентов топлива в газогенераторе.

6. Уравнение насоса горючего

$$(T_5 s + 1)\delta\tilde{H}_{н.г} = K_8(T_6 s + 1)\delta\tilde{n} - K_9(T_7 s + 1)\delta\tilde{\dot{m}}_{н.г}, \qquad (9.21)$$

где $\delta\tilde{n}$ – изображение отклонения частоты вращения ротора ТНА; $\delta\tilde{\dot{m}}_{н.г}$ – изображение отклонения расхода горючего через насос.

7. Уравнение насоса окислителя

$$(T_8 s + 1)\delta\tilde{H}_{н.о} = K_{10}(T_9 s + 1)\delta\tilde{n} - K_{11}(T_{10} s + 1)\delta\tilde{\dot{m}}_{н.о}. \qquad (9.22)$$

В уравнениях (9.21) и (9.22) $T_5, \ldots, T_{10}$ – динамические коэффициенты, учитывающие инерционные потери в тракте крыльчатки и диффузора; $K_8, \ldots, K_{11}$ – статические коэффициенты усиления, определяемые аппроксимацией скоростной и напорной характеристик насоса.

8. Уравнение магистрали подвода окислителя от насоса к газогенератору

$$(T_{11} s + 1)\delta\tilde{\dot{m}}_{о.гг} = K_{12}(\delta\tilde{H}_{н.о} - \delta\tilde{p}_{н.о} - \delta\tilde{p}_{гг}), \qquad (9.23)$$

где $\delta\tilde{p}_{н.о}$ – изображение отклонения давления на входе в насос окислителя.

9. Уравнение регулятора тяги

$$\tilde{\dot{m}}_{\text{р}} = K_{\varphi} \frac{1}{T_{2\text{р}}^2 s^2 + T_{1\text{р}} s + 1} \tilde{\varphi} + K_{\Delta} \frac{T_{2\text{р}}^2 s^2 + T_{1\text{р}} s}{T_{2\text{р}}^2 s^2 + T_{1\text{р}} s + 1} \tilde{\Delta p}_{\text{р}}, \qquad (9.24)$$

где K_{φ} и K_{Δ} – статические коэффициенты усиления по каналам управления и стабилизации; $T_{2\text{р}}^2$, $T_{1\text{р}}$ – динамические коэффициенты в уравнении движения дифференциального клапана регулятора; $\tilde{\varphi}$ и $\tilde{\Delta p}_{\text{р}}$ – изображения отклонений угла поворота привода дроссельного крана регулятора (сигнал по каналу управления тягой) и перепада давлений на регуляторе.

10. Уравнение перепада давлений на регуляторе

$$\tilde{\Delta p}_{\text{р}} = K_{13} \tilde{H}_{\text{н.г}} - \tilde{p}_{\text{гг}}, \qquad (9.25)$$

где K_{13} – коэффициент, учитывающий повышение давления на выходе из основного насоса горючего в тракте дополнительного насоса.

Если дополнительный насос в схеме ЖРД отсутствует, то $K_{13} = 1$.

11. Уравнение вращения ротора ТНА

$$(T_{12} s + 1)\tilde{n} = K_{14} \tilde{\dot{m}}_{\text{о.т}} - K_{15} \tilde{\dot{m}}_{\text{н.о}} - K_{16} \tilde{\dot{m}}_{\text{н.г}}, \qquad (9.26)$$

где T_{12} – постоянная времени ротора; K_{14}, K_{15}, K_{16} – статические коэффициенты усиления.

12. Уравнение баланса расходов

$$\tilde{\dot{m}}_{\text{н.г}} = \tilde{\dot{m}}_{\text{г.к}} + \tilde{\dot{m}}_{\text{р}}. \qquad (9.27)$$

Представленная модель является, конечно, упрощенной и может быть уточнена при проведении операций коррекции по результатам динамических, например частотных, испытаний ЖРД.

Приведенной модели соответствует структурная схема, представленная совокупностью операторов (передаточных функций) и связей между ними (рис.9.3). Она является исходной для решения различных прикладных задач.

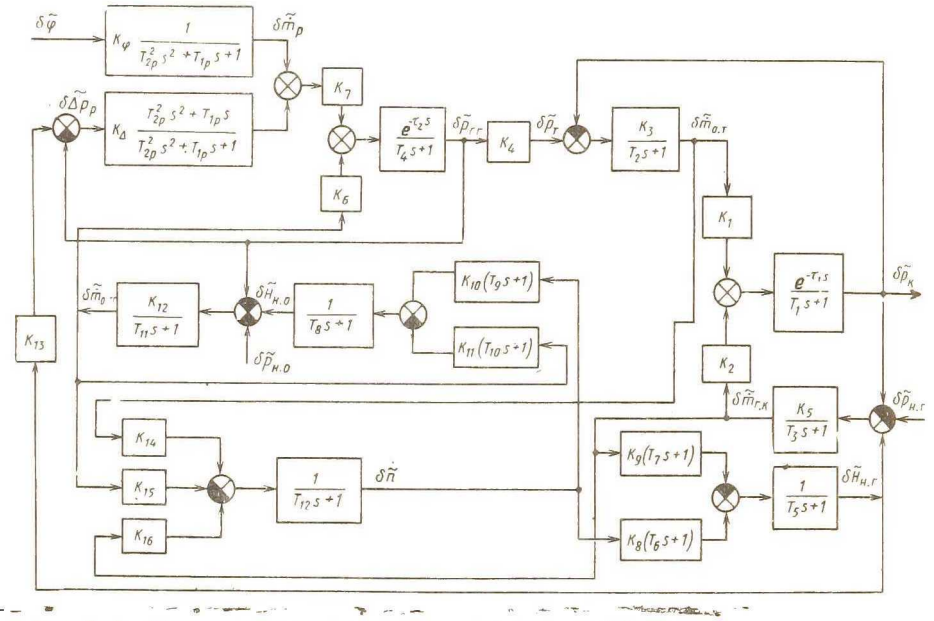


Рис. 9.3. Структурная схема динамической модели ЖРД

Модель ЖРД с вытеснительной подачей топлива включает следующие уравнения:

1. Уравнение камеры сгорания

$$T\frac{dp_к}{d\tau} + p_к = \frac{p_к}{\dot{m}_\Sigma}(K_1\dot{m}_о + K_2\dot{m}_г)(\tau - \tau_1), \qquad (9.28)$$

где $\dot{m}_\Sigma = \dot{m}_о + \dot{m}_г$.

Постоянная времени камеры T здесь определяется в результате аппроксимации реального импульса $\bar{p}_к(\tau)$.

2. Уравнение форсуночной головки и клапанного устройства

$$\dot{m}_{кл}(\tau) = R\bar{\tau}_{кл}\sqrt{p(\tau) - p_к(\tau)}, \qquad (9.29)$$

где $\tau_{кл} = \begin{cases} \tau/\tau_{кл} & \text{при } \tau < \tau_{кл} \\ 1 & \text{при } \tau \geqslant \tau_{кл} \text{ (открытие)}, \\ 0 & \text{при } \tau \geqslant \tau_{кл} \text{ (закрытие)}; \end{cases}$

$\dot{m}_{кл}$ – расход компонента топлива через клапанное устройство; p – давление перед клапаном; $\tau_{кл}$ – время движения якоря клапанного устройства.

$$R = \begin{cases} \infty & \text{при } \tau \notin \tau_{вк}, \\ R_{кл} & \text{при } \tau \in \tau_{вк}; \end{cases}$$

$\tau_{вк}$ – временной интервал включения ЖРД; $R_{кл}$ – сопротивление клапана.

Сопротивление R обычно включает потери давления и на клапанном устройстве, и на форсуночной головке.

3. Уравнения трубопроводных линий

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = L\frac{\partial \dot{m}}{\partial \tau} + R\dot{m}^2;$$

$$-\frac{\partial \dot{m}}{\partial x} = C\frac{\partial p}{\partial \tau}, \qquad (9.30)$$

где $L = 1/F$, $R = \dfrac{\lambda}{(2dF^2\rho)}$, $C = F/a^2$ – индуктивность, сопротивление и емкость 1 м трубопроводной линии; F – площадь проходного сечения; λ – коэффициент Дарси–Вейсбаха; d – диаметр трубопроводной линии; ρ – плотность компонента топлива; a – скорость звука.

Такое представление динамических свойств системы подачи объясняется необходимостью получения в решении осциллирующего движения компонентов топлива, свойственного для ДУ с вытеснительной подачей. Модель представлена в виде дифференциальных уравнений, так как необходимые для анализа решения ищут во временной области.

9.4.2. Решение динамических моделей на вычислительных устройствах

Для получения расчетных динамических характеристик с помощью разработанных аналитических моделей могут быть использованы разнообразные вычислительные устройства. Наиболее широко для этих целей применяются ЭВМ. Например, для решения задач технического диагностирования ЖРД по низкочастотным пульсациям необходимо вычисление

частотных характеристик по внутридвигательным случайным возмущениям. Для выполнения таких работ нужны специальные программы, реализуемые на ЭВМ.

Преимущества АВМ (простота выполняемых операций, оперативность и наглядность решений, дешевизна в эксплуатации) делают их незаменимыми для решения некоторых задач динамики ЖРД. Можно привести примеры эффективного использования АВМ для автономной отработки агрегатов автоматики, решения задач коррекции и т.д.

Соответствие машинным переменным (напряжениям) АВМ физических переменных моделируемого объекта определяется в виде соотношений

$$U_x = m_x x(\tau),$$

где U_x – соответствующая машинная переменная; m_x – масштаб моделирования по этой переменной; $x(\tau)$ – физическая переменная.

В определенном масштабе представляется и реальное время:

$$t = m_\tau \tau,$$

где t – машинное время; m_τ – масштаб моделирования по времени.

Это позволяет при $m_\tau > 1$ получить на АВМ реальные процессы в замедленном темпе, что имеет свои преимущества при анализе динамических процессов, например, в быстродействующих системах, какими являются ЖРД и их агрегаты.

В основу структуры АВМ положена совокупность решающих блоков в виде операционных усилителей, выполняющих умножение на постоянный коэффициент, интегрирование и дифференцирование.

Решение задач динамики на АВМ актуально в связи с современным развитием отечественных аналоговых машин (АВК-31, АВК-32, АВК-33, ЭМУ-200). Многие процедуры, характерные для аналоговой техники (коммутация решающих цепей, в частности задание постоянных коэффициентов, настройка нелинейных блоков), в этих машинах автоматизированы. Устройства ввода-вывода информации аналогичны тем, которые применяются для ЭВМ. Перспективным направлением использования устройств аналоговой техники является сопряжение их с цифровыми машинами, т.е. создание аналогово-цифровых вычислительных систем.

В заключение остановимся еще на одном методе моделирования ЖРД – методе ЭДА. В свое время этот метод широко использовался в различных областях техники, но с внедрением ЭВМ и АВМ он отошел на второй план и, надо отметить, не совсем заслуженно.

Простота, оперативность этого метода моделирования, наглядность получаемой информации, минимальные затраты на реализацию дают ему определенные преимущества по сравнению с традиционными.

В основу метода ЭДА положено формальное сходство дифференциальных уравнений, описывающих движение в элементах пневмогидравлических систем и в соответствующих электрических цепях. Любому из типовых динамических звеньев, рассматриваемых в курсе теории автоматического регулирования, таких как статическое усилительное, апериодическое, колебательное, интегрирующее и дифференцирующее, можно сформировать соответствующий электрический аналог.

Особенно эффективен метод ЭДА при решении задач динамики для протяженных и разветвленных пневмогидравлических линий. Подобные задачи часто возникают при исследовании свойств топливных систем ДУ с ЖРД.

Методами структурного моделирования можно реализовать модель практически любого приближения с учетом многих факторов, свойственных ДУ с ЖРД. Среди них – распределенность параметров гидравлических линий подачи топлива, нелинейность элементов сосредоточенных сопротивлений, запаздывание воспламенения компонентов топлива в камере и т.д. Схемная реализация всех этих факторов усложняет модель, делает ее менее оперативной, усложняет управление ее работой. В связи с этим возникает задача оптимизации этих моделей, под которой понимается совокупность операций над схемой модели, которые при сохранении требуемой точности моделирования позволяют уменьшить число элементов и упростить схему модели.

Для упрощения моделей обычно используют приемы аппроксимации характеристик отдельных элементов моделируемой системы зависимостями, обеспечивающими наиболее простые структуры блоков. В частности, трубопроводные линии, являющиеся элементами с распределенными параметрами, представляются электрическими схемами в виде совокупности конечного числа ячеек с сосредоточенными емкостью, индуктивностью и активным сопротивлением. При этом возникает задача оптимизации ячеек и закона их распределения по участкам моделируемой линии. Эта же задача актуальна при решении на АВМ, где максимальный порядок системы уравнений весьма ограничен.

Вследствие аппроксимации, а также ряда методических и инструментальных погрешностей характеристики блоков модели отличаются от характеристик соответствующих элементов физической системы. При моделировании разветвленных систем, к которым относятся ДУ КЛА, обычно задается допустимая погрешность отображения на модели ха-

рактеристики моделируемой системы в целом, а допустимые при этом погрешности отображения характеристик составляющих элементов неизвестны и подлежат определению. Одна и та же точность моделирования может быть достигнута при различных соотношениях погрешностей характеристик отдельных блоков. Такая постановка задачи особенно целесообразна при разработке эффективных средств динамической коррекции с помощью моделей, так как позволяет определить, насколько и в каком блоке системы необходимо ввести управление для изменения динамических свойств в требуемом направлении.

Очевидно, что требование оптимальности будет выполнено, когда на модели реализовано такое соотношение между погрешностями характеристик блоков, при котором заданная точность моделирования обеспечивается при максимальной сумме погрешностей характеристик блоков, взятых со своими весовыми коэффициентами.

9.4.3. Решение задач коррекции на динамических моделях ЖРД

Для такой сложной и энергетически напряженной системы, как ЖРД, решение задач диагностирования состояния – раннего обнаружения неисправности и в конечном итоге определения причин аномалии и локализации места ее начального проявления (с точностью до узла ЖРД) имеет огромное значение.

Как правило, анализ элементов ЖРД после испытания с аварийным исходом не позволяет получить точный диагноз, так как разрушения могут быть значительными. В таких случаях анализируется имеющаяся измерительная информация. Процесс анализа должен быть рациональным. Нужно иметь в виду требуемую быстроту проведения этого анализа. Здесь существенную роль могут играть методы анализа, основанные на использовании динамических моделей.

Традиционны приемы построения картотеки развития переходных процессов при задании различных возмущений в узлах (ТНА, газогенераторе, регуляторе и т.д.). Рассчитываются параметры переходных процессов относительно измеряемых при испытании параметров ЖРД. И по совпадению характерных участков зарегистрированных при испытании процессов, предшествующих аварийной ситуации или сопровождающих ее, и расчетных данных из имеющейся картотеки судят о причине и месте неисправности.

При анализе, конечно, применяется вычислительная техника как для получения расчетных переходных процессов, так и для вариантных

переборов при решении задачи идентификации. Эти методы достаточно широко освещены в литературе.

Рассмотрим решение на динамических моделях з а д а ч к о р р е к ц и и, связанных с предъявлением к ЖРД многочисленных требований по количественным и качественным показателям динамических процессов. Безусловными являются требования обеспечения устойчивости рабочих процессов в ЖРД. В зависимости от назначения ЖРД и его схемы формулируются дополнительные требования, накладывающие ограничения на параметры динамических процессов в области времени или частоты. Так, для мощных ЖРД ракет-носителей, выполняемых по схеме с дожиганием, формируются, например, такие требования:

обеспечение заданного качества переходных процессов по функциям $p_к(\tau)$, $p_{вх.н}(\tau)$ на участках запуска и выключения, при этом ограничиваются максимальные значения $p_к$ при выходе на промежуточную ступень, время перехода на основной режим, импульс последействия ЖРД, гидроудары и минимальные значения на входах в насосы ТНА;

обеспечение заданных частотных характеристик ЖРД по каналу управления $\Phi_у(\omega) = \dfrac{\delta p_к}{\delta \varphi}(\omega)$, где $\delta\varphi$ – отклонение угла поворота привода регулятора расхода, и каналу продольных колебаний $\Phi_{п.к}(\omega) = \dfrac{\delta p_к}{\delta p_{вх.н}}(\omega)$;

ограничение энергетических показателей спектральных характеристик свободных колебаний давления $p_к$ на основном режиме.

Эти требования связаны с обеспечением надежной работы самого ЖРД и выполнением таких условий, как устойчивое управление ракетой в плоскостях стабилизации (при использовании метода рассогласования тяг), обеспечение заданного запаса устойчивости в контуре продольных колебаний ракеты, предотвращение выраженных резонансных явлений в системе ракета–ЖРД и т.д.

Для ДУ систем ориентации и стабилизации КЛА, в состав которых входят ЖРДМТ с вытеснительной топливной системой, эти требования сводятся в основном к обеспечению минимальной степени нестационарности процессов в трубопроводных линиях подачи топлива. Особенности систем ориентации и стабилизации, связанные с наличием протяженных и разветвленных трубопроводов, с минимизацией путевых по-

терь на трение в них и импульсным характером работы ЖРД, создают предпосылки для развития в топливной системе значительных по амплитуде колебаний давлений и расходов компонентов. Это, в свою очередь, отрицательно сказывается на параметрах динамических и энергетических характеристик ЖРД, снижает их параметрическую и конструкционную надежность.

Как для мощных ЖРД, так и для ДУ с ЖРДМТ актуальны также вопросы обеспечения устойчивого функционирования агрегатов автоматики-регуляторов расхода и давления, дренажно-предохранительных клапанов. Конечно, эти вопросы могут решаться в процессе экспериментальной отработки ЖРД путем проведения испытаний на натурных объектах. Однако такой путь не всегда рационален, если учитывать сложность и дороговизну натурного эксперимента для ЖРД. Поэтому здесь весьма эффективно могут быть использованы приемы исследования динамических процессов на моделях.

Если данные, полученные в результате эксперимента или путем модельных решений, свидетельствуют о необходимости введения корректирующих управлений в систему ДУ для удовлетворения требованиям, предъявляемым по динамическому качеству, то появляется задача рационального выбора средств реализации требуемой коррекции.

На практике задачи коррекции динамического качества возникают, как правило, на стадии испытаний уже созданной ДУ. И это сводит коррекцию к вмешательству лишь в агрегаты автоматики (регуляторы) или в трубопроводные линии топливных систем. Однако и в этих случаях приемы коррекции могут быть весьма эффективны.

Рассмотрим приемы коррекции динамических характеристик ЖРД с дожиганием изменением степени демпфирования дифференциального клапана регулятора тяги. Они наиболее приемлемы, так как связаны лишь с заменой жиклера, всегда устанавливаемого в дифференциальном клапане. Если обратиться к модели регулятора (см. рис.9.3), то очевидно, что такое управление приведет в операторах, связывающих изображение выходного параметра регулятора-расхода $\tilde{\dot{m}}_{\text{р}}$ с изображением возмущений $\tilde{\delta\varphi}$ и $\tilde{\delta\Delta p}_{\text{р}}$, лишь к изменению коэффициента $T_{1\text{р}}$, оценивающего степень демпфирования дифференциального клапана. И если в режиме стабилизации расхода $m_{\text{р}}$ при оценке динамических характеристик ЖРД, например в контуре продольных колебаний, реакция на такое управление очевидна (чем ниже степень демпфирования, т.е.

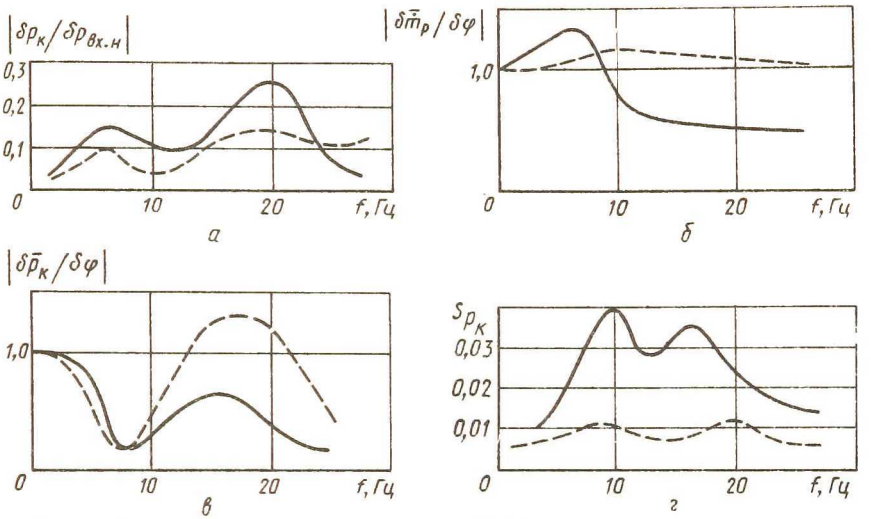


Рис.9.4. Динамические характеристики ЖРД с дожиганием генераторного газа:

—— $T'_{1р}$; – – – $T''_{1р}$ ($T'_{1р} > T''_{1р}$)

чем больше площадь проходного сечения жиклера, тем выше степень стабилизации расхода и модуль частотной характеристики

$\Phi_{п.к}(\omega) \dfrac{\delta \bar{p}_к}{\delta p_{вх.н}}(\omega)$ будет снижаться (рис.9.4, *а*), по крайней мере на низких частотах колебаний), то в режиме управления, когда $\delta\varphi \neq$ $\neq$ const конечная реакция регулятора на введение такой коррекции должна быть подвергнута анализу.

Обратимся к динамической модели регулятора, представленной двумя операторами, связывающими приращения расхода с сигналами $\delta\varphi$ и $\delta\Delta p_р$.

Проведем анализ в частотной области при условии $\delta\varphi = A_{\delta\varphi}\sin\omega\tau$, $A_{\delta\varphi}$ = const в интересующем диапазоне частот $\omega \in [0, \omega_{max}]$. Решение на модели дает несколько неожиданный результат, связанный с усилением проявления форсирующих свойств регулятора, т.е. с увеличением

$\left| \dfrac{\delta \dot{\bar{m}}_р}{\delta \varphi} \right|$ при увеличении $T_{1р}$, которое наблюдается на низких

частотах (рис.9.4, *б* и *в*). На этих рисунках $\delta\dot{m}_{р}$ и $\delta\bar{p}_{к}$ – безразмерные отклонения $\dot{m}_{р}$ и $p_{к}$.

Анализ, который можно провести с учетом того, что $\delta\dot{m}_{р}$ формируется из двух составляющих, см. уравнение (9.24), т.е.

$$\delta\dot{m}_{р} = \delta\dot{m}_{р\varphi} + \delta\dot{m}_{р\Delta} = K_{\varphi}\Phi_{р\varphi}(\omega)\delta\tilde{\varphi} + K_{\Delta}\Phi_{р\Delta}(\omega)\delta\Delta\tilde{p}_{р}, \qquad (9.31)$$

где $\delta\dot{m}_{р\varphi}$ и $\delta\dot{m}_{р\Delta}$ – составляющие отклонения изображения расхода через регулятор тяги по каналам управления и стабилизации; $\Phi_{р\varphi}(\omega)$ и $\Phi_{р\Delta}(\omega)$ – частотные функции регулятора тяги по каналам управления и стабилизации, объясняет это обстоятельство (рис.9.5). При уменьшении $T_{1р}$ скорость движения вектора $\overrightarrow{\delta\dot{m}_{р\varphi}}$ по годографу частотной функции $\Phi_{р\varphi}(\omega)$ при изменении ω будет незначительной. Такое же изменение свойственно для вектора $\overrightarrow{\delta\dot{m}_{р\Delta}}$. Т.е. регулятор хорошо выполняет свои функции как органа управления и стабилизации. При увеличении $T_{1р}$ эта скорость возрастает и создаются условия, когда еще не обратившийся в нуль модуль вектора $\overrightarrow{\delta\dot{m}_{р\varphi}}$ складывается с уже зна-

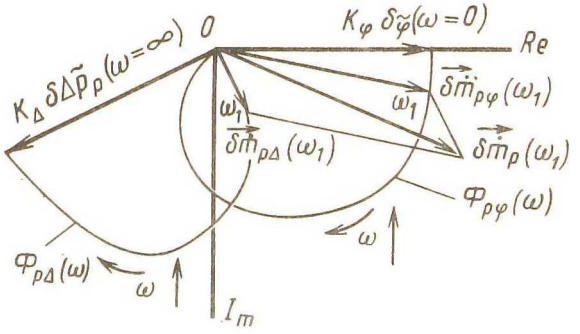


Рис.9.5. Векторная диаграмма изменения параметра $\delta\dot{m}_{р}$ при $\delta\tilde{\varphi}$ = var

чительным по модулю вектором $\delta\vec{\dot{m}}_{p\Delta}$. Рассуждая аналогично и учитывая влияние T_{1p} на характер годографов частотных характеристик $\Phi_{p\varphi}(\omega)$ и $\Phi_{p\Delta}(\omega)$, можно объяснить и дальнейший характер изменения функции $\left|\frac{\delta\dot{m}_p}{\delta\varphi}\right|$ при изменении частоты вариации параметра $\delta\varphi$ (см. рис.9.4, *б*).

Приведенный анализ влияния степени демпфирования дифференциального клапана регулятора на динамические характеристики ЖРД, полученные при задании детерминированных возмущений $\delta p_{вх.н}(\omega)$ и $\delta\varphi(\omega)$, позволяет интерпретировать и результаты статистической обработки свободных колебаний давления $p_к$ на установившемся режиме. На рис.9.4, *г* приведен график спектральной плотности давления в камере сгорания $S_{p_к}$. Возможность управления двигателем здесь также очевидна. Чем выше его быстродействие (меньше T_{1p}), тем больше он может стабилизировать нестационарный процесс. Это в итоге сказывается на выходных параметрах ЖРД, подлежащих оценке.

Однако следует иметь в виду, что уменьшение T_{1p} при решении задач коррекции имеет свой рациональный предел, который определяется из условий минимального потребного демпфирования узла, обладающего значительным статическим коэффициентом усиления (дифференциального клапана регулятора) и охваченного обратной связью в контуре как самого регулятора, так и ЖРД.

Кроме рассмотренного приема коррекции динамических характеристик ЖРД с помощью регулирующего органа, широко применяются методы, основанные на введении корректирующих воздействий в топливные магистрали ДУ. Ограниченные требованиями минимизации потерь давления в топливных трактах возможности использования корректирующих устройств с чисто активным волновым сопротивлением (дроссселей) обусловили необходимость разработки самых разнообразных схем реактивных гасителей и демпфирующих устройств. Корректирующие устройства могут выполнять функцию частотной отстройки, например, при обеспечении запаса устойчивости системы ракета–ЖРД в контуре продольных колебаний. Чаще всего корректирующие устройства такого типа (гаси-

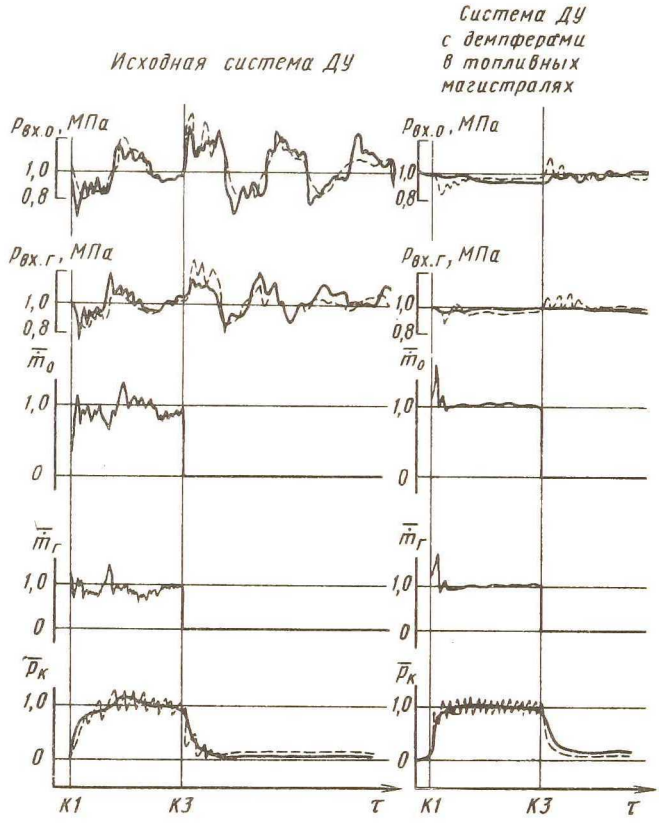


Рис. 9.6. Графики переходных процессов в ДУ с вытеснительной подачей компонентов топлива:

——— результаты решения на электрической модели;

– – – результаты огневого испытания

тели, демпферы) устанавливаются в магистрали для увеличения степени диссипации энергии колебаний рабочего тела. Это предотвращает возможное проявление резонансных явлений в топливных системах, увеличивает декремент затухания колебаний, повышает запас устойчивости регулятора и в итоге улучшает показатели качества динамических процессов.

С помощью моделей решаются вопросы о месте установки корректирующего устройства, о выборе его структуры и параметров. Как правило, модельные решения носят вариантный характер или строятся с

использованием алгоритмов системы автоматизированного проектирования. На рис.9.6 показаны результаты модельных решений для ДУ с вытеснительной подачей компонентов топлива. Здесь $p_{вх.о}$, $p_{вх.г}$ – давления окислителя и горючего на входе в ЖРДМТ; $\bar{\dot{m}}_{о}$, $\bar{\dot{m}}_{г}$ – безразмерные массовые расходы окислителя и горючего; $\bar{p}_{к}$ – безразмерное давление в камере сгорания; К1 – команда на запуск ЖРДМТ; К3 – команда его останова.

Модельный эксперимент проведен на электрической модели ДУ, он позволил выбрать параметры *RC* гидравлического демпфера, снижающего степень нестационарности процессов в топливной системе. Из приведенных результатов следует, что с помощью моделей можно эффективно решать задачи динамической коррекции.

Контрольные вопросы

1. Дайте общую характеристику типовых приемов моделирования.
2. Почему для задач моделирования испытаний ЖРД применяют в основном аналитические методы?
3. Приведите типовую структуру реализации аналитического метода моделирования.
4. Какие погрешности являются определяющими при составлении экспериментально-аналитической модели?
5. Какие приемы используют при составлении модели статических свойств ЖРД?
6. Какие приемы используют при составлении модели динамических свойств ЖРД?
7. Что означает понятие адекватности модели и какие приемы используют для получения заданной степени адекватности?
8. Приведите структуру низкочастотной динамической модели ЖРД с дожиганием.
9. Дайте общую характеристику методов вычислительной реализации решений для динамических моделей ЖРД и проведите их сравнительную оценку.
10. На чем основан метод ЭДА?
11. Как решаются задачи коррекции на динамических моделях ЖРД?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алемасов В.Е., Дрегалин А.А., Тишин А.П.** Теория ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1989. 533 с.

2. **Беляев Н.М., Белик Н.П., Уваров Е.И.** Реактивные системы управления космическими летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1979. 232 с.

3. **Бендат Д., Пирсол А.** Применение корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1983. 309 с.

4. **Васильев П.П., Кудрявцев В.М., Кузнецов В.А.** Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей /Под общ. ред. В.М. Кудрявцева. М.: Высшая школа, 1983. 703 с.

5. **Кесаев Х.В., Трофимов Р.С.** Надежность двигателей летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1982. 137 с.

6. **Колесников К.С.** Динамика ракет. М.: Машиностроение, 1980. 375 с.

7. **Лихачев В.Я., Васин Н.С., Гликман Б.Ф.** Техническая диагностика пневмогидравлических систем ЖРД. М.: Машиностроение, 1983.

8. **Новицкий П.В., Зограф И.А.** Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 248 с.

9. **Таблицы** планов эксперимента для факторных и полиномиальных погрешностей моделей /В.З. Бродский, Л.К. Бродский, Т.И. Голикова и др.; Под ред. В.В. Налимова. М.: Металлургия, 1982. 752 с.

10. **Теория** и техника теплофизического эксперимента /Под ред. В.К. Щукина, М.: Энергоатомиздат, 1985. 360 с.

11. **Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.** Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. 286 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Список используемых сокращений 5

Глава 1. Виды испытаний и их назначение 6
1.1. Особенности испытаний ЖРД 6
1.2. Классификация испытаний ЖРД 8
Контрольные вопросы 37

Глава 2. Основные понятия метрологии. Теоретические основы эксперимента 38
2.1. Общие сведения об измерениях, средствах и погрешностях измерения 38
2.2. Причины, вызывающие погрешности измерений 48
2.3. Закон нормального распределения случайных погрешностей измерений. Понятия о среднем квадратическом отклонении, предельной и вероятной погрешностях измерений 51
2.4. Определение доверительного интервала и доверительной вероятности при малом числе измерений 58
2.5. Погрешности косвенных измерений 60
2.6. Метрологические требования к системам измерений. Оценка их погрешностей и погрешностей результатов испытаний 67
2.7. Приведение результатов испытаний к номинальным условиям . 74
2.8. Основные приемы обработки результатов экспериментов 75
Контрольные вопросы 82

Глава 3. Краткие сведения о методах планирования эксперимента 83
3.1. Основные задачи и положения метода планирования эксперимента 83
3.2. Целевая функция и факторы 85
3.3. Выбор модели 87
3.4. Полный факторный эксперимент 89

3.5. Дробный факторный эксперимент 94
3.6. Обработка результатов опытов и их интерпретация 98
3.7. Планы эксперимента для изучения нелинейной поверхности отклика 102
Контрольные вопросы 109

Глава 4. Методы измерения основных параметров ЖРД 110
4.1. Измерительные системы, их звенья и характеристики 110
4.2. Устройства для измерения основных параметров 116
4.3. Вторичные преобразователи информации 153
4.4. Системы регистрации 154
4.5. Системы синхронизации регистраторов 162
4.6. Особенности измерительных систем 165
Контрольные вопросы 172

Глава 5. Испытательные комплексы, стенды и установки 173
5.1. Испытательные комплексы 173
5.2. Испытательные стенды и наблюдательные бункеры 174
5.3. Топливная система стенда 181
5.4. Заправка топливных баков, заполнение расходных магистралей и процессы, происходящие в топливных магистралях при срабатывании клапанов 189
5.5. Система управления испытаниями 192
5.6. Система наддува топливных баков и система продувок 199
5.7. Тягоизмерительное устройство. Методы определения тяги ... 204
5.8. Устройства для испытания высотных двигателей в наземных условиях 209
5.9. Автономные испытания агрегатов 215
Контрольные вопросы 225

Глава 6. Автоматизация испытаний 226
6.1. Задачи автоматизации испытаний. Структура автоматизированных испытательных комплексов 226
6.2. Методы представления информации о параметрах ЖРД 233
6.3. Применение современной вычислительной техники при автоматизации испытаний 236
6.4. Системы диагностирования и аварийной защиты 244
Контрольные вопросы 255

Глава 7. Методология проведения опытных и серийных испытаний 256
7.1. Имитация условий эксплуатации при наземной отработке

ЖРД 256
7.2. Методы обеспечения динамического соответствия стендовых топливных систем ракетным 265
7.3. Специальные динамические испытания ДУ 269
7.4. Текущий контроль надежности ЖРД в условиях серийного производства 276
7.5. Технология испытаний ЖРД в серийном поизводстве 279
Контрольные вопросы 288

Глава 8. Особенности испытаний ЖРДМТ 289
8.1. ЖРДМТ, требования к их отработке и испытаниям 289
8.2. Особенности измерений при испытаниях ЖРДМТ 294
8.3. Стенды для испытаний ЖРДМТ 305
Контрольные вопросы 317

Глава 9. Моделирование испытаний 318
9.1. Методы моделирования ЖРД 318
9.2. Принципы составления комбинированных моделей 320
9.3. Модели статических свойств объекта испытаний 324
9.4. Динамические модели ЖРД 327
Контрольные вопросы 347
Список литературы 348

Учебное издание

Жуковский Александр Евгеньевич,
Кондрусев Виктор Семенович,
Окорочков Владислав Владимирович

ИСПЫТАНИЯ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Редакторы *В.И. Сухейли, О.Г. Красильникова, Т.П. Топчий*
Художественный редактор *В.В. Лебедев*
Технический редактор *О.В. Рожкова*
Корректоры *Л.В. Тарасова, П.В. Нерода*

ИБ № 6282

Сдано в набор 28.03.90. Подписано в печать 12.10.92.
Формат 60 × 88/16. Бумага № 2 офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ.л. 21,56. Усл.кр.-отт. 21,69 Уч.-изд.л. 20,97.
Тираж 650 экз. Заказ 1676 «С»

Ордена Трудового Красного Знамени издательство "Машиностроение,
107076, Москва, Стромынский пер., 4

Отпечатано в московской типографии № 9
НПО "Всесоюзная книжная палата Министерства печати и информации
Российской Федерации, Москва, Волочаевская ул., д. 40,
с оригинала-макета, изготовленного в издательстве "Машиностроение"
на персональных ЭВМ по программе "Астра-Н", разработанной НИИЦЭВТ