

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ им. С. П. КОРОЛЕВА

*В. Г. Забогин, В. С. Кондрусев, В. Е. Нигодюк*

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖРД

*Учебное пособие*

УДК 629.7.036.5 (621.454.2)

З а б о т и н В. Г., К о н д р у с е в В. С., Н и г о д ю к В. Е.  
**Характеристики ЖРД:** Учебное пособие. — Куйбышев: КуАИ,  
1981, с. 91.

В данном пособии систематизирован опыт экспериментального определения регулировочных характеристик ЖРД малой тяги в непрерывных и импульсных режимах. Рассмотрены особенности рабочего процесса двигателей малой тяги, методы и средства проведения их испытаний, измерения параметров рабочего процесса, ручной и автоматизированной обработки результатов испытаний.

Пособие предназначено для студентов дневного и вечернего отделений, обучающихся по специальностям 0537, 0538, и может быть рекомендовано студентам других специальностей и слушателям факультетов повышения квалификации ИТР, для которых читаются курсы по двигателям летательных аппаратов.

Темплан 1981, поз. 91.

Рецензенты: проф. В. Д. Курпаченков,  
канд. техн. наук В. Д. Пак

Утверждено редакционно-издательским  
советом института 28.11.79 г.

© Куйбышевский авиационный институт, 1981

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

Предлагаемая книга является учебным пособием по курсам «Теория двигателей летательных аппаратов» и «Испытания двигателей летательных аппаратов».

Необходимость написания настоящего пособия продиктована тем, что известная на сегодня учебная литература по двигателям летательных аппаратов, в частности по ЖРД [1], достаточно полно отражает различные вопросы теории, проектирования и конструкции, но практически не освещает методологию экспериментального получения тяговых характеристик и характеристик экономичности, по которым оценивается степень совершенства создаваемого двигателя.

Руководствуясь стремлением реализовать в процессе подготовки будущих специалистов все звенья цепи «гипотеза—эксперимент—теория», авторы обобщили в пособии опыт настройки ЖРД малой тяги на рассчитанный рабочий режим, подготовки и проведения экспериментов по определению регулировочных характеристик, обработки экспериментальных данных и анализа полученных результатов. Выбор в качестве объекта исследования ЖРД малой тяги не случаен, он обусловлен невозможностью экспериментирования в условиях учебного процесса с ЖРД большой тяги. ЖРД малой тяги не могут полностью моделировать ЖРД больших тяг, но позволяют экспериментально получить широкий комплекс регулировочных характеристик, рассмотреть перспективу совершенствования двигателей.

В первом разделе книги рассматриваются особенности рабочих процессов и устройства ЖРД малой тяги на самовоспламеняющемся двухкомпонентном топливе, методы и средства измерения и регистрации их параметров, экспериментальное оборудование для наземных и высотных испытаний ЖРД малой тяги. Сведения, изложенные в этом разделе, позволяют подготовить студента к практическому выполнению экспериментальных исследований ЖРД малых тяг.

Второй раздел содержит методологию ручной и действующей автоматизированной обработки информации, получаемой при исследованиях ЖРД малой тяги в непрерывных и импульсных режимах работы, а также методы статистического анализа экспериментальных данных. Изложенный материал помогает студенту выполнить первичную обработку результатов испытаний двигателя.

В третьем разделе излагаются теоретические сведения о статических регулировочных характеристиках и об особенностях оценки характеристик импульсной работы ЖРД малой тяги в режиме одиночных включений, описываются методы экспериментального определения основных характеристик камер ЖРД малой тяги, анализируются результаты исследования регулировочных характеристик ЖРД малой тяги.

Методически пособие построено с учетом решения конкретных задач исследования. Поэтому каждый раздел структурно закончен, ориентирован на практическое применение в качестве дополнительного материала к соответствующим описаниям, в частности, при выполнении лабораторных работ и домашних заданий.

Авторы выражают признательность кафедре МАИ, возглавляемой д-ром техн. наук проф. Б. В. Овсянниковым, рецензентам проф. В. Д. Курпатенкову и канд. техн. наук В. Д. Паку за критические замечания и полезные советы, направленные на улучшение содержания книги, и благодарят коллег по работе, оказавших помощь в сборе материала, в работе над рукописью и ее оформлении.



# 1. ИССЛЕДОВАНИЯ ЖРДМТ. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

---

## 1.1. ОСОБЕННОСТИ ЖРДМТ

Целью исследования двигателя является получение исчерпывающей информации, позволяющей сделать вывод о его функционировании в заданном диапазоне изменения различных воздействующих факторов. Наиболее достоверными методами решения этой задачи пока являются экспериментальные. Проведение экспериментального исследования предполагает выполнение достаточно широкого комплекса измерений параметров двигателя, характеризующих его работу в условиях, близких к эксплуатационным. Поэтому при создании экспериментального оборудования и средств, обеспечивающих испытания, необходимо исходить прежде всего из назначения двигателя, определяющего уровень рабочих параметров, его конструктивное исполнение и другие особенности.

Из двигателей на химическом топливе, обеспечивающих вывод аппарата в космическое пространство и управление его положением, наиболее распространены ЖРД. В зависимости от назначения этих двигателей необходимые уровни тяг колеблются от долей ньютона до нескольких миллионов ньютонов, что обуславливает существенные различия в конструкции и принципах организации их рабочего процесса. Из всего многообразия ЖРД, созданных к настоящему времени, двигатели малой тяги (ЖРДМТ) выделены в отдельный класс (ГОСТ 22396-77).

ЖРДМТ нашли широкое применение при решении задач ориентации и стабилизации, коррекции траекторий и орбит, при выполнении различных маневров аппарата [2].

От двигателей активной системы управления пространственным положением аппаратов требуется срабатывание до нескольких сотен тысяч раз, причем в зависимости от задач управления (ориентация и стабилизация) длительность одного включения двигателя может изменяться от нескольких сотых и даже тысячных долей секунды до десятых ее долей. Если же двигатели используются для коррекции, то они работают непрерывно от нескольких секунд до нескольких минут. Столь широкий диапазон импульсных и непрерывных режимов обеспечивают ЖРДМТ, работающие на самовоспламеняющихся двухкомпонентных топливах, которые состоят из азотно-кислотных окислителей и гидразиновых горючих. К настоящему времени созданы двигатели этого класса, развивающие тягу в несколько десятых долей ньютона. Верхний же предел тяги ЖРДМТ составляет величину 1600 Н.

Создание совершенного ЖРДМТ на низкие уровни тяги причем с одинаково высокой степенью эффективности работающего как в непрерывных, так и в импульсных режимах, представляет весьма сложную техническую проблему. Главнейший источник трудностей заключается в малых значениях расходов топлива в ЖРДМТ, составляющих в непрерывных режимах в зависимости от номинала тяги величины от долей г/с до нескольких десятков г/с. В импульсных режимах величина расходуемого топлива за импульс намного меньше расхода в непрерывном режиме.

Столь малые количества топлива, расходуемые не только при импульсной, но и при непрерывной работе двигателя, фактически исключают возможность использования в ЖРДМТ наружного регенеративного охлаждения стенок камеры одним из компонентов из-за малого теплосъема. Как следствие, для таких двигателей очень остро стоит задача защиты стенок конструкции от прогара при контакте с высокотемпературными продуктами сгорания применяемых топлив.

Для решения этой задачи остается только один путь — организация внутри камеры низкотемпературного пристеночного слоя. При этом высокая экономичность двигателя при условии надежного внутреннего охлаждения может быть получена лишь при размещении большого числа микрорасходных форсунок на головке небольших размеров. Поскольку такие головки чрезвычайно сложны, то обычно на головке ЖРДМТ размещается сравнительно небольшое количество форсунок. В результате неизбежно ухудшаются показатели экономичности рабочего процесса из-за появления в камере двигателя

крупномасштабной неравномерности распределения компонентов по поперечному сечению камеры сгорания.

Достаточно типичной является схема смесеобразования в ЖРДМТ (рис. 1.1), формирующая двухзонную эпюру распределения компонентов. В приосевой центральной зоне создается соотношение компонентов, близкое к стехиометрическому, вблизи стенок — пониженное.

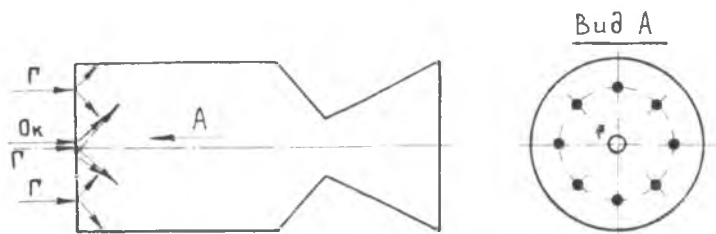


Рис. 1.1. Схема смесеобразования в ЖРДМТ

Подача окислителя в камеру сгорания обычно осуществляется через одну или несколько (в зависимости от величины расхода) форсунок только в центральную зону.

Горючее через форсунки, расположенные ближе к периферии головки, подается и на стенку камеры с целью создания низкотемпературного пристеночного слоя, и в высокотемпературное ядро потока. Количество форсунок зависит от расхода горючего, располагаться они могут в один или несколько ярусов. С увеличением тяги двигателя возрастает величина расхода горючего, что облегчает решение задачи охлаждения стенки. К тому же появляется благоприятная для повышения экономичности двигателя возможность оставшуюся от затрат на охлаждение часть горючего подать непосредственно в центральную область потока, разместив здесь же соответствующие форсунки.

В ЖРДМТ нашли применение струйные, центробежные и целевые форсунки, располагающиеся на плоской или шатровой головках. Наиболее распространены цилиндрическая камера сгорания с приведенной длиной (отношение объема камеры сгорания, включая сужающуюся часть сопла, к площади минимального сечения) порядка 0,5 м и осесимметричное сопло Лавала с геометрической степенью расширения (отношение площадей выходного и минимального сечений сопла) порядка 40.

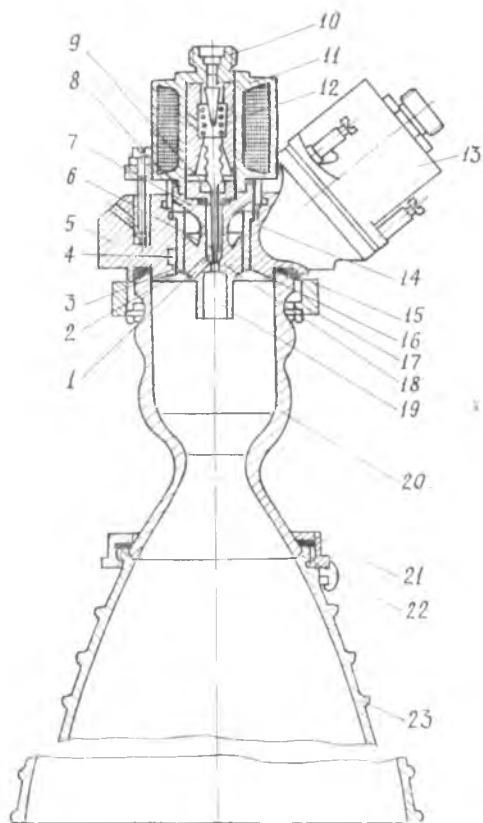


Рис. 1.2. Конструкция двигателя R—4 Д:  
 1 — восемь отверстий окислителя; 2 — восемь основных форсунок горючего; 3 — восемь форсунок горючего для охлаждения;  
 4 — коллектор горючего; 5 — головка; 6 — подвод окислителя; 7 — вкладыши; 8 — изолятор; 9 — седло; 10 — клапан окислителя;  
 11 — катушка электромагнита; 12 — пружина; 13 — клапан горючего; 14 — подвод горючего; 15 — уплотнение; 16 — восемь форсунок для охлаждения предкамеры; 17 — кольцо; 18 — отверстие окислителя; 19 — предкамера; 20 — камера; 21 — кольцо; 22 — сопло; 23 — насадок

В качестве примера конструктивной компоновки ЖРДМТ приведен продольный разрез американского двигателя R—4Д тягой 450 Н фирмы Марквард (рис. 1.2), на котором хорошо видны его основные узлы и элементы. Расположенные на форсуночной головке топливные клапаны с быстродействующим электромагнитным приводом обеспечивают подачу компонентов из топливных магистралей к форсункам камеры сгорания. От быстродействия привода зависят динамические показатели двигателя, которые играют важную роль при импульсной работе. Улучшение динамических показателей достигается также минимизацией объемов полостей от клапанов до среза форсунок за счет уменьшения времени заполнения этих полостей (они получили название — «заклапанные») топливом после открытия клапанов и опорожнения — после закрытия.

С уменьшением номинала тяги возраста-



ет конструктивная и технологическая сложность ЖРДМТ, так как уменьшение потребных расходов компонентов обуславливает уменьшение проходных сечений гидравлических трактов.

## 1.2. ИЗМЕРЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

К основным параметрам ЖРДМТ, подлежащим измерению и регистрации, относятся:

- сила тяги, создаваемая двигателем;
- расходы компонентов;
- давления газов в камере сгорания, компонентов в магистралах на входе в двигатель, в баках и др.;
- температуры компонентов, стенок конструкции и т. д.;
- время работы двигателя.

Средства измерения этих параметров должны обеспечивать надежную информацию о работе двигателя как в непрерывных, так и в импульсных режимах. При измерении медленно меняющихся или стационарных параметров точность измерения не зависит от инерционности средства измерения, что существенно облегчает задачу. Возможность исследования неустановившихся процессов обеспечивают измерительные устройства с весьма высокими собственными частотами, для получения которых в ряде случаев необходимо создать нестандартные средства измерения. Нередко из-за отсутствия средств измерения на низкий уровень параметров, выпускаемых промышленностью, в практике исследований ЖРДМТ разрабатываются оригинальные измерительные системы и для стационарных процессов. Широко используются электрические методы измерения как стационарных, так и быстроменяющихся процессов.

### ИЗМЕРЕНИЕ ТЯГИ

О величине тяги, создаваемой двигателем, можно судить либо по силе реакции, которую оказывают узлы крепления, расположенные на испытательном станке, двигателю, препятствуя его перемещению при работе в направлении действия тяги, либо по импульсу силы, создаваемому в единицу времени истекающими из сопла газообразными продуктами сгорания. Эти два метода, положенные в основу измерения тяги ЖРДМТ, названы соответственно «реактивный» и «активный» и воплощены в разнообразных устройствах.

Среди си́лоизмерителей, действующих на реактивном принципе, широко применяется устройство в виде консольно закрепленной на массивной опоре упругой балки, на которую монтируется двигатель обычно в вертикальном положении, соплом вниз (рис. 1.3).

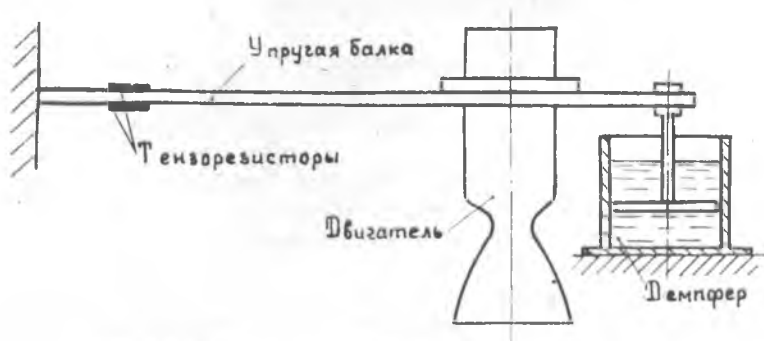


Рис. 1.3. Схема измерения тяги реактивным методом

Площадь поперечного сечения (чаще всего прямоугольной формы) балки подбирается в зависимости от ожидаемой величины тяги двигателя. При работе двигателя под действием силы тяги балка прогибается, и по величине упругой деформации прогиба можно определить значение действующей тяги. Чтобы быстро погасить колебания упругой системы, возникающие в моменты начала и окончания работы двигателя, а также при переходе с одного режима на другой, применен гидравлический демпфер. Измерение силы тяги осуществляется здесь путем замера относительных деформаций чувствительного элемента, пропорциональных величине измеряемого усилия. В качестве чувствительных элементов используются проволочные тензорезисторы, наклеиваемые на упругую балку на некотором расстоянии от ее жестко закрепленного конца.

Тензорезисторы состоят из нескольких петель проволоки, наклеенных на тонкую бумажную или лаковую основу (рис. 1.4). Сверху тензорезистор для предохранения от механических повреждений закрывается также бумагой или лаковой пленкой. Спротивление изоляции тензорезистора должно быть в пределах 50...100 М Ом.

Тензорезисторы изготавливаются из проволоки диаметром 0,01...0,03 мм. Благодаря малому температурному коэффици-

енту сопротивления и сравнительно высокому коэффициенту тензочувствительности  $k = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}$  наиболее часто применяется константовая проволока. Основными характеристиками тензорезистора являются тензочувствительность  $k$ , номинальное сопротивление  $R$  и база  $b$  (см. рис. 1.4).

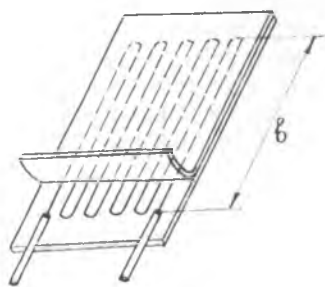


Рис. 1.4. Схема тензорезистора

Тензорезисторы имеют малые габариты, массу и применяются при измерениях стационарных и быстроменяющихся упругих деформаций. При прогибе балки под действием силы тяги происходит изменение длины  $l$ , площади поперечного сечения  $S$  и удельного сопротивления  $\rho$  материала тензорезисторов, вследствие чего изменяется их электрическое сопротивление  $R = \rho (l/S)$ .

Для уменьшения погрешности измерения и компенсации влияния температуры на результаты измерения применяются мостовые измерительные схемы. Тензорезисторы располагаются на верхней и нижней плоскостях упругой балки один против другого на одинаковом расстоянии от оси двигателя (см. рис. 1.3). Оба тензорезистора — активные, при работе верхний  $T_1$  сжимается, а нижний  $T_2$  растягивается, что удваивает чувствительность измерительной схемы.

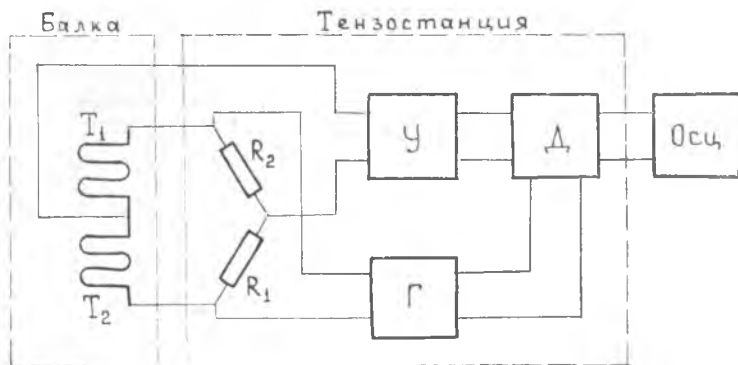


Рис. 1.5. Блок-схема тензонизмерения тяги

Тензорезисторы  $T_1$  и  $T_2$  соединены по схеме выносного полумоста (рис. 1.5), вторая половина измерительного моста включена в схему тензостанции на несущей частоте и постоянных сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ . Питание мостовой схемы осуществляется высокочастотным переменным синусоидальным напряжением от генератора  $G$ .

При изменении сопротивления тензометрических первичных преобразователей  $T_1$  и  $T_2$  в измерительной диагонали моста возникают модулированные по амплитуде колебания с частотой, наложенной на несущую частоту генератора. После усиления (в усилителе  $У$ ) и выделения частоты исследуемого процесса (демодулятором  $Д$ ) сигнал регистрируется на светолучевом осциллографе.

Частоту собственных колебаний  $f$  системы измерения тяги с помощью упругой балки, работающей на изгиб, можно определить по формуле

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{(m_{дв} + \xi m_0)\delta}}$$

где  $P$  — величина силы тяги;  $m_{дв}$ ,  $m_0$  — соответственно массы двигателя и части упругой балки, участвующие в колебательном движении;  $\xi$  — коэффициент, зависящий от взаимного расположения двигателя и балки;  $\delta$  — величина перемещения центра масс двигателя под действием силы тяги  $P$ .

Анализ показывает, что собственные частоты такой системы измерения тяги не превышают 150...200 Гц. Поэтому данная система пригодна только для измерения тяги в стационарных и квазистационарных режимах.

Частоту собственных колебаний механической части системы измерения тяги удается существенно (до нескольких кГц) увеличить при активном методе, когда измеряется не реакция истекающих из сопла газов, как в описанном устройстве, а прямое силовое воздействие сверхзвуковой струи. Здесь двигатель фиксируется, а за срезом сопла устанавливается легкая газоприемная ловушка (ее масса не превышает 0,1 кг), связанная с жесткой мембраной силоизмерителя. Такой нестандартный прибор применяется для измерения быстроменяющихся значений тяги в импульсных режимах.

Соотношение между величиной сигнала, регистрируемого при реактивном методе замера, и силой тяги, создающей этот сигнал, устанавливается градуировкой. Градуировка выполняется при полностью смонтированном на упругой балке двигателе со всеми подводными трубопроводами, коммуникаци-

онными линиями и измерительными средствами. При градуировке осуществляется сначала нагружение устройства от нулевой до примерно ожидаемой в эксперименте величины силы тяги ступенчато с тем, чтобы иметь 3—4 промежуточных показания, а затем в обратной последовательности выполняется разгружение.

В качестве типичного примера на рис. 1.6 представлена осциллограмма процесса градуировки силоизмерительного устройства, выполненная в диапазоне изменения тяги 0...80 Н.

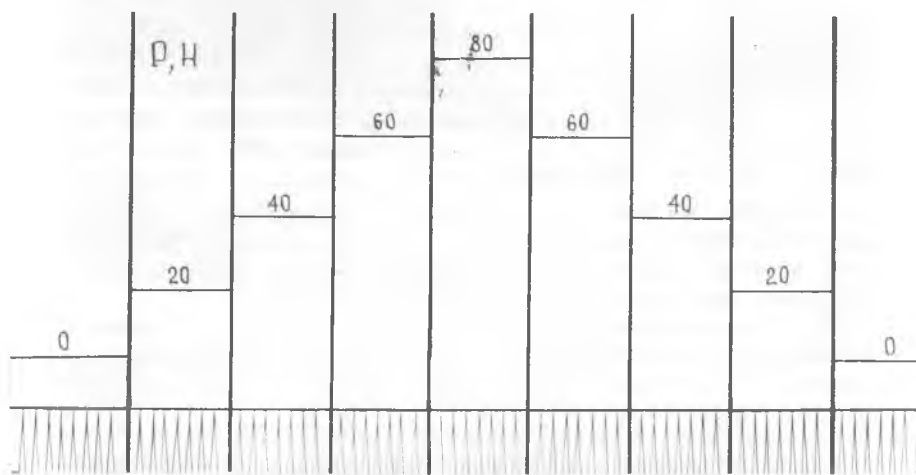


Рис. 1.6. Осциллограмма градуировки силоизмерителя

Здесь нижняя линия неизменна и является базовой, от нее ведется отсчет при обработке осциллограммы. Второй луч перемещается пропорционально прилагаемой нагрузке. При ширине фотоленты 120 мм максимальное отклонение луча обычно составляет величину порядка 60 мм. Расшифровка градуировочной осциллограммы начинается с определения величин отклонения луча при различных нагрузках:  $l_p = l_p' - l_0$ , где  $l_p'$  — расстояния, отсчитанные последовательно от базовой линии до всех положений луча (берутся посредине линий) при нагружении (ступени слева) и разгрузке;  $l_0$  — расстояние от базовой линии до положений луча при отсутствии нагрузки.

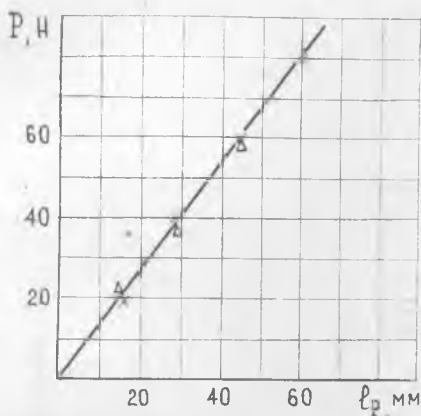


Рис. 1.7. Градуировочный график

Если эти два условия выполняются, то определяется масштабный коэффициент измерения тяги  $\mu_P = P_{\max} / (l_P)_{\max}$ , который затем используется при обработке результатов эксперимента с замером тяги работающего двигателя.

После выполнения экспериментов аналогично допусковой проводится послепусковая градуировка измерительных средств. Между этими двумя градуировками не должно быть расхождений.

### ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДОВ КОМПОНЕНТОВ

Из-за малости величины расходов компонентов, что обусловлено небольшими уровнями тяг исследуемых двигателей и непродолжительными их огневыми пусками, в основном применяется объемный способ измерения расходов, при котором фиксируется изменение объема компонентов топлива за время пуска.

Объемный расходомер выполняется обычно в виде прочной стеклянной калиброванной трубки, на наружной поверхности которой нанесена оцифрованная миллиметровая шкала. Для предохранения от повреждений трубка помещается в металлический корпус, имеющий сквозную продольную прорезь по длине шкалы, ориентированную на наблюдателя. Постоянство диаметра по длине трубки, используемой в качестве расходомера, обеспечивает линейность его характеристики и одинаковость цены деления для всей шкалы.

Затем в масштабе строится градуировочный график  $P = f(l_P)$  (рис. 1.7), по которому делается заключение о линейности градуировки и определяется относительная погрешность градуировки по максимальной разности показаний осциллографа при нагружении и разгрузении, которая не должна превышать 0,5%, иначе градуировка бракуется.

Цена делений расходомеров горючего  $\mu_r$  и окислителя  $\mu$  устанавливается путем предварительных проливок несмачивающими спиртовыми жидкостями, при этом выявляется также линейность характеристики расходомера.

Объемные расходы компонентов обычно определяются в эксперименте за одно включение двигателя. Соответствующие величины массовых расходов получают в результате пересчета:  $\Delta m_{г,ок} = \mu_{г,ок} \Delta l_{г,ок} \rho(t)_{г,ок}$ , где  $\Delta l_{г,ок}$  — разница уровней по шкале расходомера (соответственно горючего и окислителя) до и после пуска;  $\rho(t)_{г,ок}$  — плотность компонента в зависимости от его температуры (табличные данные).

Погрешность измерения расхода уменьшается при увеличении отсчитываемой разности уровней  $\Delta l$ , поэтому в эксперименте желательно максимально использовать рабочую часть расходомера, увеличивая длительность пуска. Это не всегда удается сделать при исследовании двигателей в режиме коротких единичных импульсных включений, когда расходы весьма малы.

### ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЙ

Для измерения давления наддува компонентов, а также давления газов в камере сгорания двигателя, в непрерывных режимах широко применяются пружинные манометры. Для предохранения трубчатых пружин манометров, установленных на топливных магистралях, от воздействия коррозионно-активных компонентов и их паров применяются специальные разделительные устройства. Пружина манометра, обеспечивающего замер давления в камере сгорания, во избежание контакта с высокотемпературными газами соединяется с камерой сгорания трубкой, в которую заливается вода.

Измерение быстроменяющихся давлений осуществляется электрическими методами — довольно часто с помощью первичных преобразователей ДД-10 индуктивного типа. В качестве чувствительного элемента в этом первичном преобразователе (рис. 1.8) используется жесткая мембрана. При измерении давления в камере сгорания принимаются меры для защиты мембраны от воздействия высоких температур.

Первичный преобразователь ДД-10 работает по принципу изменения индуктивности при прогибе упругой мембраны. Мембрана 1, воспринимающая измеряемое давление, является

якорем индуктивной системы: рабочая обмотка 2 и идентичная ей компенсирующая обмотка 3 включаются в мостовую схему так, чтобы обеспечивалась полная температурная компенсация при изменении температуры в пределах  $\pm 50^\circ\text{C}$ . Индуктивность рабочей катушки  $L \approx$

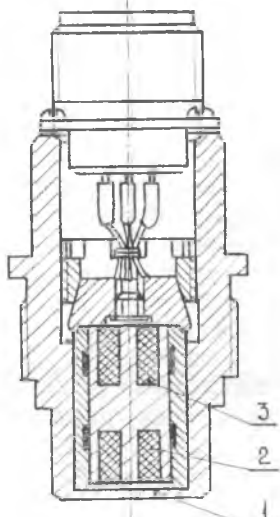


Рис. 1.8. Первичный преобразователь давления ДД-10

$\approx 1,25 \cdot 10^{-8} k \frac{S_{\text{в}}}{l_{\text{в}}} \omega^2$ , где  $S_{\text{в}}$  — площадь поперечного сечения магнитного потока в воздушном зазоре между мембраной и катушкой;  $l_{\text{в}}$  — средняя длина магнитных силовых линий в воздушном зазоре;  $\omega$  — число витков;  $k$  — поправка, учитывающая, что диаметр катушки не бесконечно мал в сравнении с ее длиной.

При заданных параметрах переменного напряжения питания ток в цепи рабочей катушки оказывается пропорциональным величине  $l_{\text{в}}$ , т. е. прогибу мембраны. Сигнал с первичного преобразователя давления поступает на усилитель типа ИД-2И и после него — на осциллограф.

Для повышения точности измерения давления до и после эксперимента проводятся статические градуировки измерительного канала, состоящего из первичного преобразователя ДД-10, усилителя ИД-2И и шлейфа осциллографа. При градуировках первичный преобразователь для измерения давления в камере сгорания устанавливается либо на гидравлическом прессе типа МТ-60, либо на специальном пневматическом нагрузочном устройстве. Иногда можно выполнить градуировку смонтированного на камере сгорания первичного преобразователя путем подачи сжатого воздуха в полость камеры через устройство, навинчиваемое на сопло.

Градуировка первичных преобразователей давлений компонентов в магистралях производится наддувом линий при закрытых топливных клапанах двигателя. Полученные осциллограммы градуировок первичных преобразователей давления аналогичны по виду осциллограммам градуировки силоизмерителя (см. рис. 1.6). Методически одинаково проводится и их расшифровка.



## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

Температуры компонентов в топливных магистралях и температуры стенки конструкции измеряются термопарами (рис. 1.9), принцип действия которых основан на генерировании термоэлектродвижущей силы (э.д.с.) в составленной из двух проводников (*A* и *B*) цепи, соединения которых находятся при различных температурах ( $t_{\text{изм}}$  и  $t_0$ ). Материалы проводников (термоэлектродов) подбираются из условия получения наибольшей термо-э.д.с. в заданных пределах измерения температуры.

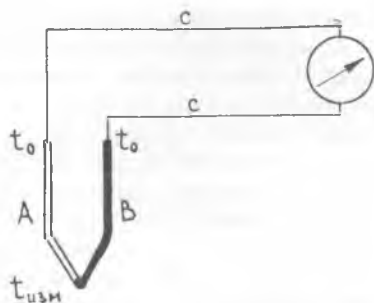


Рис. 1.9. Схема термопары

Для измерения температур от  $-200$  до  $800^{\circ}\text{C}$  применяются стандартные хромель—копелевые термопары, от  $-200$  до  $1200^{\circ}\text{C}$ —хромель—алюмелевые термопары (хромель: 90% Ni + 10% Cr; копель: 56% Cu + 44% Ni; алюмель: 95% Ni + 5% Al, Si, Mg).

ХА — термопара имеет практически линейную характеристику, применение ХК—термопары обеспечивает весьма высокую термо-э.д.с., хотя она и имеет некоторую нелинейность. Обе термопары получили широкое применение в практике испытаний ДЛА.

В качестве регистрирующих применяются приборы типа КСП-4 — для измерения температуры компонентов, МПЩПР-50 — температуры стенок. Связь термопары с прибором обычно осуществляется с помощью удлинительных компенсационных проводов (обозначены буквой *c* на рис. 1.9). Компенсационные провода не вносят дополнительной погрешности, если в местах соединения их со свободными концами термопары поддерживаются одинаковые температуры  $t_0$ , а термо-э.д.с., развиваемая компенсационными проводами, равна по величине термо-э.д.с. самой термопары в диапазоне температур концов проводов.

Инерционность термопар зависит от наличия или отсутствия в них защитных чехлов (такие чехлы имеются у ХК—термопар, устанавливаемых в магистралях подвода компонентов), от размеров термоэлектродов и свойств измеряемой

среды. Малонерционные (с постоянной времени порядка 0,2 с) термопары с открытым рабочим спаем удобны для измерения температуры поверхности конструкции. Спай такой термопары непосредственно припаивается или приваривается к поверхности, температура которой измеряется. Для снижения величины теплового потока, рассеиваемого спаем и проводами термопары, применяются термопары с возможно более тонкими термоэлектродами. Провода термопары при этом укладываются на поверхности (рис. 1.10) так, чтобы тепловой контакт осуществлялся на длине не менее  $50d$  (здесь  $d$  — диаметр проволоочки). Электрическую изоляцию проволоочек и поверхности обеспечивают прокладки из тонкой слюды или изолирующие обмазки.

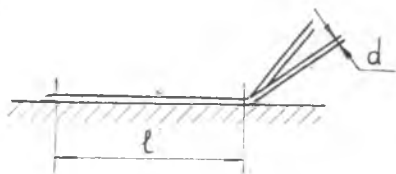


Рис. 1.10. Укладка поверхностной термопары

Для периодической проверки термопар используется метод так называемой «холодной» градуировки, при котором работа термопары имитируется с помощью источника регулируемого напряжения (ИРН), включаемого в цепь термопары, спаи которой находятся при комнатной температуре, и поэтому термо-э.д.с. отсутствует. Настройкой ИРН к цепи термопары подводятся различные э.д.с., которым соответствуют определенные табличные значения температур для данной термопары. Электродвижущие силы ИРН измеряются включенным параллельно потенциометром; температуры, показываемые термопарой, отсчитываются по шкале регистрирующего прибора. Расхождение между табличным значением и результатами отсчета по шкале является погрешностью измерения, по максимальной величине которой подсчитывается класс точности.

Для повышения точности «холодную» градуировку термопар желательно дополнить проверкой «горячим» способом хотя бы на одной из температур (путем подогрева рабочего спаи, например, в электропечи).

### РЕГИСТРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ

В практике исследований ЖРДМТ для регистрации параметров широко применяются светолучевые осциллографы, в частности, современные отечественные осциллографы

фы типа Н-115. Осциллограф Н-115 обеспечивает одновременную запись 12 параметров на ультрафиолетовую фотобумагу УФ-67 шириной 120 мм, не требующую химического проявления.

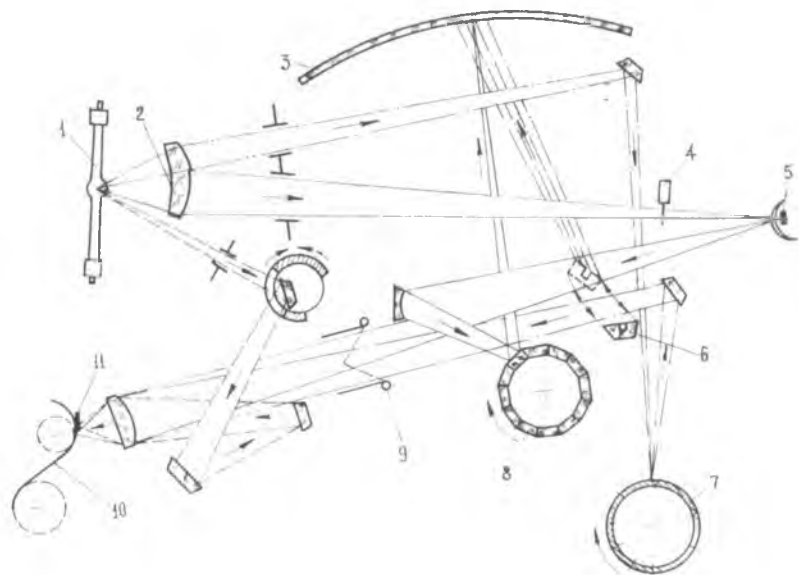


Рис. 1.11. Оптическая схема осциллографа Н-115: 1 — ртутная лампа; 2 — конденсор; 3 — экран; 4 — идентификатор; 5 — гальванометр; 6 — зеркало; 7 — модулятор; 8 — барабан; 9 — диафрагма; 10 — фотолента; 11 — пластина

Оптическая схема осциллографа Н-115 для одного канала записи приведена на рис. 1.11. Пучок ультрафиолетового излучения в виде яркой полосы от ртутной лампы сложным цилиндрическим конденсором 2 приводится в плоскость зеркала гальванометра (вибратора) 5. Гальванометр представляет собой миниатюрную систему с поворачивающимся зеркалом, осуществляющую прямое преобразование электрического сигнала с первичного преобразователя в физический символ. Отразившись от зеркала гальванометра, световой пучок фокусируется на движущуюся с определенной скоростью фотоленту 10 в виде пятна малого диаметра, при этом осуществляется запись сигнала. Диафрагмой 9 можно регулировать интенсивность записи. Часть светового пучка от зеркала гальва-

нометра направляется зеркальным развертывающим барабаном 8 на матовый экран 3 для визуального наблюдения. Идентификатор 4 служит для поочередного разрыва линий записи от гальванометров, что позволяет установить их протекание в случае слияния или пересечения. Зеркалом 6 регулируются начальные положения гальванометров. Отражающая поверхность этого зеркала матовой полосой поделена симметрично пополам, поэтому на экране луч от каждого гальванометра имеет две световые полосы, которые при правильной установке гальванометра примерно одинаковы по яркости и по длине.

Одновременно с записью измерительных сигналов на фотоленту наносятся линии отметок времени (осуществляется вертикальное графление по всей ширине фотоленты) и уровней сигналов (продольное графление). На схеме ход лучей для получения отметок времени показан штрих—пунктирными линиями с двумя точками. Модулятором светового потока является вращающийся барабан 7 с десятью прорезями, одна из которых шире девяти остальных. Возможно задание одной из четырех скоростей вращения барабана—отметчика: 3, 30, 300, 3000 об/мин, которыми устанавливается интервал времени между смежными отметками соответственно: 2; 0,2; 0,02; 0,002 с. Таким образом, отметка времени получается без дополнительного источника света. Ход лучей продольного графления на схеме показан штриховыми линиями. Через систему зеркал световой поток в виде яркой линии проецируется на расположенную перед лентой пластину 11, имеющую ряд узких щелей, через которые осуществляется экспонирование, и на осциллограмме получают тонкие продольные линии.

Пример записи на осциллографе Н-115 при малой скорости протяжки фотоленты пяти характерных параметров ЖРДМТ приведен на рис. 1.12. Здесь осциллограмма движется справа налево, отметка времени выполнена через 0,2 с и записано огневое включение двигателя в течение примерно 1,6 с. Следы лучей от зеркал вибраторов расположены на осциллограмме сверху вниз в следующем порядке: ток  $i$  и напряжение  $u$  на обмотке электромагнита топливных клапанов, давление  $p_{вх}$  в магистрали подачи одного из компонентов перед двигателем, тяга  $P$  двигателя, давление  $p_k$  в камере сгорания, базовая линия. Для удобства чтения осциллограммы у трех верхних лучей изменена полярность, обработка этих параметров должна вестись с обратным знаком (т. е. лучи  $i$  и  $u$  в момент включения двигателя показывают не уменьшение, а увеличение этих параметров по сравнению с их значе-

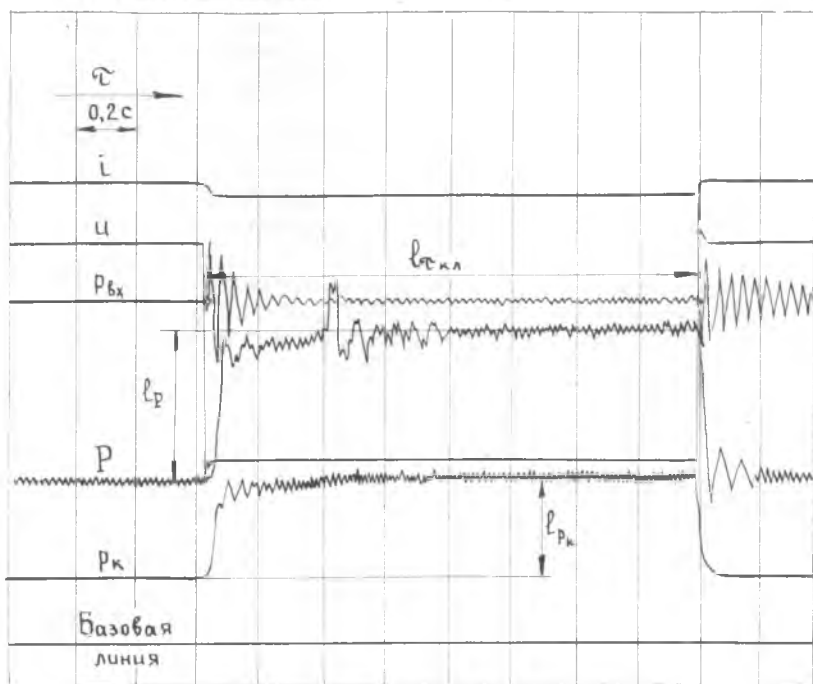


Рис. 1.12. Осциллограмма работы ЖРДМТ

ниями до пуска, луч  $p_{вх}$  — наоборот). Лучи  $P$  и  $p_{к}$  отражают реальную картину измерения этих параметров при работе двигателя.

### 1.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

С точки зрения организации исследований малость расходов топлива и использование вытеснительной системы топливоподдачи в ЖРДМТ благоприятствуют созданию достаточно простого и надежного комплекса для холодных проливов и огневых испытаний двигателей. На таком комплексе можно экспериментально изучать характеристики ЖРДМТ в широком диапазоне воздействующих факторов, а также проводить исследования особенностей и эффективности процессов горения и истечения. Существенные различия между

ЖРД и ЖРДМТ не позволяют получить количественные аналогии, но качественные результаты приемлемы, поскольку преобразование жидкого топлива в газообразные высокотемпературные продукты сгорания и в ЖРД, и в их моделях происходит качественно одинаково.

Огневые стенды для испытаний ЖРД классифицируются [3] в зависимости от:

- рода окислителя — кислородные, перекисные и кислотные;
- расположения продольной оси двигателя — вертикальные, горизонтальные и наклонные;

- способа подачи компонентов к двигателю — с турбонасосной, вытеснительной и подачей самотеком;

- способа удаления продуктов сгорания — с открытым и закрытым выхлопом;

- рода и назначения двигателя — земные, высотные и подводного пуска.

В практике испытаний ЖРДМТ, малоразмерных камер сгорания и газогенераторов нашли применение земные и высотные стенды. На таких стендах используется вытеснительная система топливоподачи. При работе на токсичных компонентах с расходами, превышающими предельно допустимые нормы выбросов в окружающую среду, предусмотрена система нейтрализации продуктов, дренируемых из топливной системы.

На земных стендах проводится отработка стационарных режимов работы камер сгорания и газогенераторов, а также могут изучаться пусковые характеристики двигателей нижних ступеней ракет. Объект исследования находится при испытаниях в условиях среды огневого бокса.

Исследования двигателей систем управления, а также верхних ступеней должны проводиться на высотных стендах, имитирующих условия эксплуатации по давлению и температуре окружающей среды.

При определении характеристик ЖРДМТ испытания необходимо проводить в вакуумных камерах, в которых создаются низкие (порядка десятых долей Па) давления. Двигатель помещается в вакуумную камеру и находится в условиях разрежения. Важно обеспечить низкое давление и в полости камеры сгорания перед запуском. В противном случае, во-первых, исказится картина запуска, так как химическая активность компонентов, характеризующаяся периодом задержки их воспламенения  $\tau_{зв}$ , существенно зависит от давления в камере сгорания, где происходит взаимодействие компонен-

тов (увеличение давления ускоряет экзотермические реакции и сокращает время задержки воспламенения, т. е. наблюдается значительное различие такого запуска от запуска в вакууме при практически нулевом значении давления). Во-вторых, в сверхзвуковой части сопла, степень расширения газов в котором порядка 600...800, может образоваться скачок уплотнения, что исключает возможность получения достоверных данных при измерении развиваемой двигателем пустотной тяги  $P_n$ . И, в-третьих, изменяются характер опорожнения объемов заклпанных полостей при останове двигателя и тепловые состояния камеры сгорания и сопла при длительной непрерывной работе. Поэтому в практике экспериментальной отработки ЖРДМТ сложились два основных направления исследований:

динамических (занимают во времени тысячные доли секунды) процессов запуска и останова;

продолжительной (до нескольких сот секунд) работы на стационарных режимах.

И в том, и в другом случаях двигатель при испытаниях должен находиться при низких давлениях окружающей среды.

Получили распространение два варианта высотных огневых стендов для испытаний ЖРДМТ:

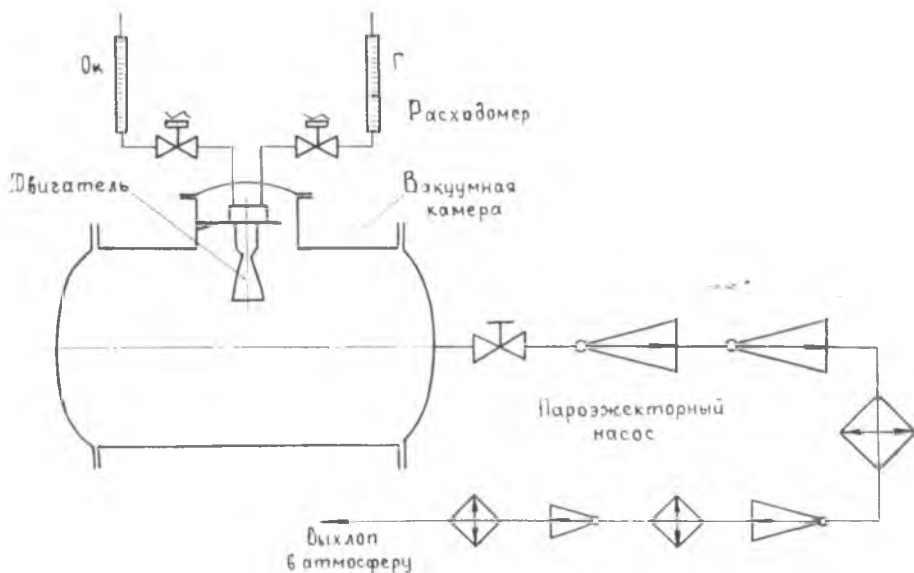


Рис. 1.13. Схема расходного вакуумного стенда

расходный (рис. 1.13), когда в вакуумной камере (иногда только на срезе сопла двигателя) поддерживается постоянное низкое давление, обеспечивающее безотрывное течение газов по соплу в продолжение длительного времени работы двигателя; на расходных стендах проводятся исследования стационарных режимов ЖРДМТ;

нерасходный, в котором в отличие от расходного варианта откачка высокотемпературных продуктов сгорания в процессе кратковременной работы двигателя не проводится, а начальное низкое давление в вакуумной камере обеспечивается механическими или паромасляными вакуум-насосами, которые на период огневого пуска отсекаются от вакуумной камеры вакуумной задвижкой, что приводит к росту давления в вакуумной камере в процессе пуска за счет накопления продуктов сгорания; на схеме (см. рис. 1.13) у нерасходного варианта стенда вместо пароэжекторного насоса будет система вакуум-насосов, остальные элементы — общие с расходным вариантом; нерасходные стенды позволяют исследовать импульсные режимы работы ЖРДМТ.

Расходный вариант стенда характеризуется более широкими возможностями, но он более сложен и требует мощных средств откачки горячих газов. В практике испытаний ЖРДМТ применяются и комбинированные варианты стендов, в которых вакуумная камера связана и с пароэжекторным насосом, и с группой механических или паромасляных насосов.

В испытательный комплекс обычно входят два стенда: для холодных гидравлических проливов форсунок и экспериментальный огневой стенд для исследований в земных и высотных условиях ЖРДМТ, малоразмерных камер сгорания и газогенераторов.

На проливочном стенде исследуется работа форсунок ЖРДМТ с целью настройки двигателя на заданное соотношение компонентов. Работу форсунки характеризуют следующие основные параметры:

массовый расход жидкости через форсунку в единицу времени;

перепад давлений на форсунке;

равномерность распределения капель жидкости в факеле распыла;

мелкость и однородность распыла;

дальнобойность факела.

Для настройки двигателя необходимо знание расходных характеристик форсунок — зависимостей расходов жидкостей



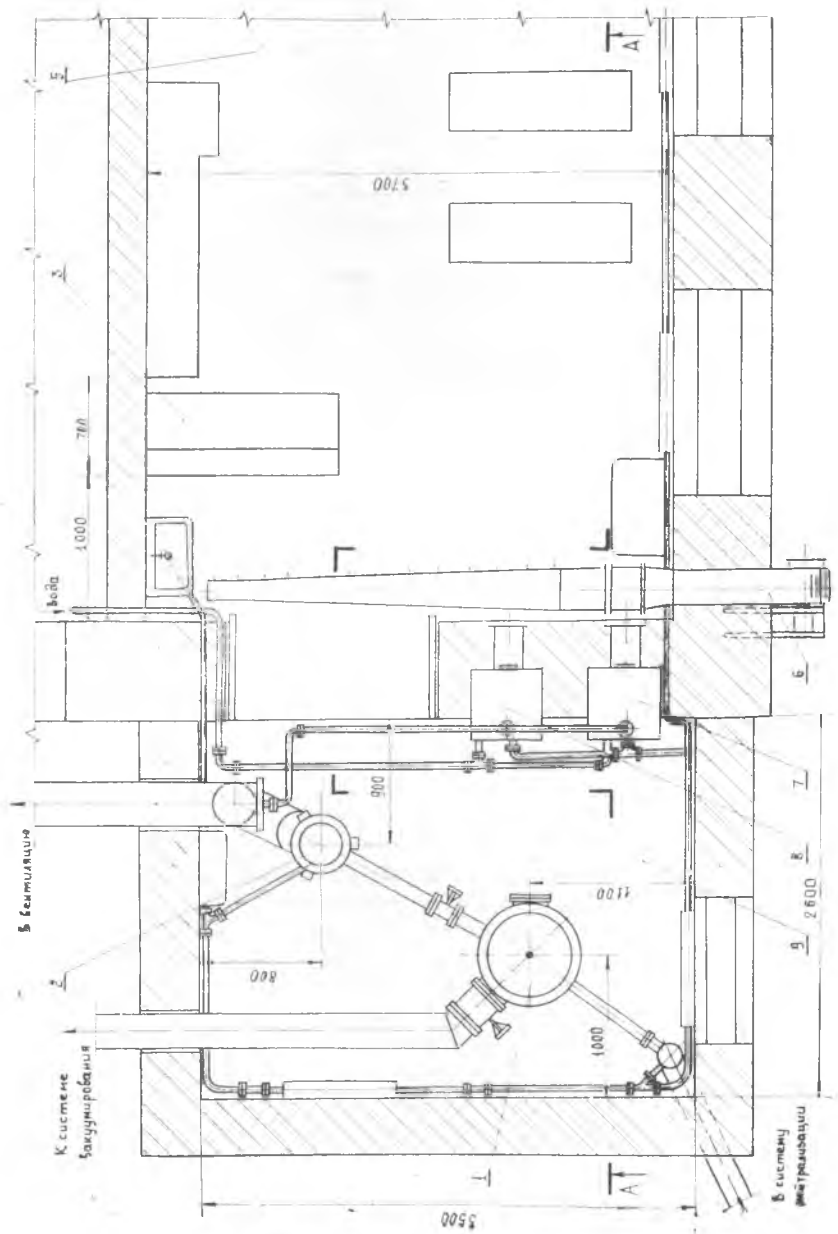
через форсунки от перепадов давлений на них. Эти зависимости определяются по результатам проливки форсунок водой. Три остальных параметра имеют важное значение при проектировании и доводке форсунок и смесительных элементов, но в процессе проливки, как правило, они не контролируются. В состав проливочного стенда входят: исследуемая форсунка, бак с водой, магистраль подвода воды из бака к форсунке, система вытеснения воды из бака сжатым воздухом, запорная арматура, средства измерения давлений, расхода воды через форсунку и времени.

Огневой стенд, планировка которого представлена на рис. 1.14, предназначен для проведения учебно-исследовательских работ с экспериментальными ЖРДМТ на жидких токсичных самовоспламеняющихся компонентах, поэтому все его элементы выполнены в соответствии с требованиями обеспечения безопасности людей и окружающей среды, а системы, непосредственно подверженные воздействию компонентов, их паров и продуктов сгорания, выполняются из нержавеющей стали.

Стенд включает установку для испытаний в земных условиях и вакуумную камеру, соединенную и с пароэжекторным насосом, и с батареей механических вакуум-насосов. Стенд обеспечивает возможность проведения исследования двигателей тягой до 100 Н в земных условиях на стационарных режимах работы и в высотных условиях при импульсной работе. ЖРДМТ тягой до 20 Н могут испытываться в условиях вакуума в непрерывных режимах работы.

При испытаниях ЖРДМТ, малоразмерных камер сгорания и газогенераторов огневой бокс, кабина управления, оборудование, хранилища рабочих тел, технологические помещения и все системы стенда, как правило, располагаются в одном здании. Малорасходный экспериментальный огневой стенд (см. рис. 1.14) создан по этому принципу.

Стенд имеет дистанционное управление работой двигателя, установленного на станке в огневом боксе. Присутствие людей в боксе допускается только при отсутствии избыточного давления в системе подачи компонентов. В огневом боксе на случай взрыва предусмотрено ослабленное место—крыша. Наблюдение за работой двигателя и показаниями расходомеров ведется из пульты через бронезащитные стекла. Приточно-вытяжная вентиляция стенда обеспечивает перепад давлений  $\Delta p = 1,4$  Па между огневым боксом и пульты, что предотвращает попадание в нее паров токсичных компонентов.



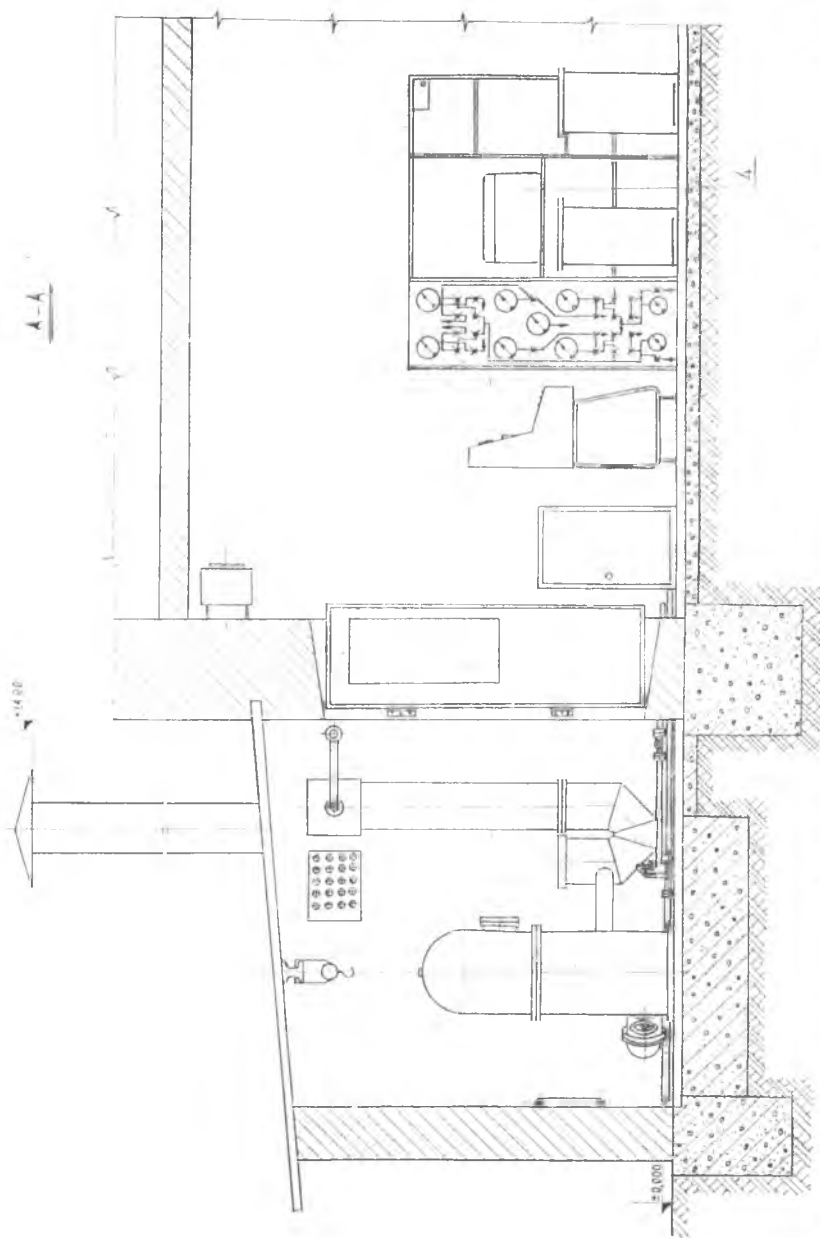


Рис. 1.14. Планировка стента: 1 — вакуумная камера; 2 — наземная установка; 3 — пульт управления; 4 — осциллограф; 5 — учебная аудитория; 6 — приточная вентиляция; 7 — контейнер окислителя; 8 — контейнер горючего; 9 — огневой бокс

Все сточные воды со стенда подаются в нейтрализационный колодец. После соответствующей обработки их до допустимой концентрации горючего и окислителя и взятия проб для контроля они сливаются в ливневую канализацию.

При испытаниях в земных условиях двигатель (или газогенератор) устанавливается на станке в вертикальном положении соплом вниз в направлении газоотводящего устройства.

Топливная система стенда выполнена в двух герметичных отсеках: горючего и окислителя. Отсеки имеют идентичную конструкцию и смонтированы между боксом и пультовой, из которой осуществляется измерение расходов топлива. Каждый отсек имеет индивидуальную вентиляцию с 60-кратным воздухообменом и подвод воды для смыва дренированных или пролитых компонентов.

Принципиальная схема стенда представлена на рис. 1.15. Управление работой однотипных систем питания двигателя горючим (на схеме справа) и окислителем осуществляется с пульта. В системах используются отсечные пневмогидроклапаны, срабатывание которых осуществляется при подаче командного воздуха от электропневмоклапанов. Каждая система имеет бак объемом 4 л для хранения на стенде необходимого запаса компонента и небольшой расходный бачок с уровнем-расходомером. Для наддува баков в системе хранения и подачи горючего используется газообразный азот, доставляемый на стенд в баллонах; для баков 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 величины давлений осуществляется по манометрам, находящимся на щитке перед оператором. Для поддержания постоянной величины давления наддува компонентов обе системы имеют ресиверы. Сброс давления из полостей над жидкими компонентами осуществляется посредством открытия дренажных пневмогидроклапанов 1 и 4.

Выполнение операций заправки и перекачки компонентов из одних емкостей в другие осуществляется с помощью пневмогидроклапанов 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10. Ручные вентили 12 служат для подсоединения к стенду внешних топливных емкостей при заправке баков стенда или полном сливе из них компонентов. Пневмогидроклапаны 5 и 6 обеспечивают работу

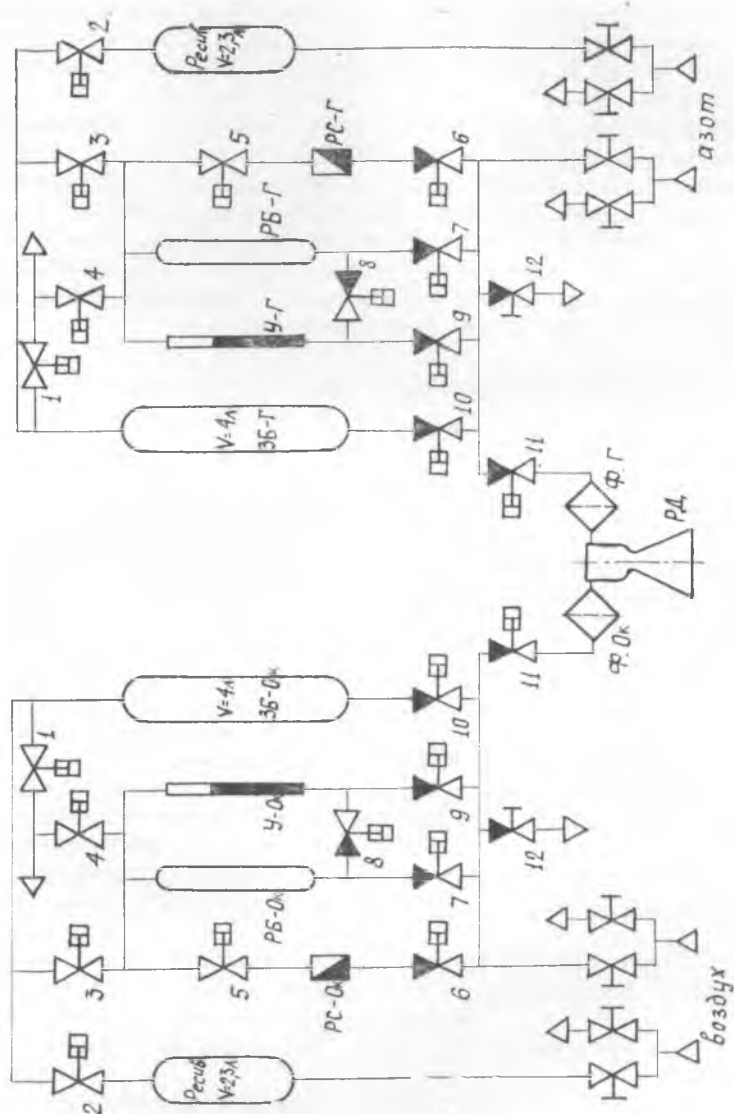


Рис. 1.15. Пневмогидравлическая схема стенда

сильфонных расходомеров РС. Пневмогидроклапаны 11 располагаются в непосредственной близости к двигателю (вне отсеков Г и Ок) и выполняют функции отсечных стендовых клапанов.

Для контроля за работой клапанов на пульте выполнена мнемосхема, аналогичная приведенной на рис. 1.15, где срабатывание того или иного клапана отмечается его сигнальной лампочкой. Запуск, останов двигателя и управление осциллографом также осуществляются с пульта. Кроме тумблеров управления, на пульте расположены приборы для контроля электрических параметров на клапанах двигателя, счетчик импульсов, электрический секундомер и др.

## 2. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ЖРДМТ

---

### 2.1. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Испытания двигателей дают очень большой объем информации по каждому измеряемому параметру. Эта информация содержится либо в зашифрованном виде на осциллограммах, термограммах и в протоколах испытаний, либо в более или менее обработанном виде — в машинных протоколах—распечатках при использовании средств автоматизации испытаний. И в том, и в другом случаях проводится полная расшифровка и анализ этой первичной информации до аттестации двигателя на ее основе.

При исследовании работы ЖРДМТ в непрерывных режимах осуществляется измерение следующих параметров:

тяги двигателя — по осциллограмме записи сигнала с тензорезисторов;

давления в камере сгорания — манометром или по осциллограмме записи сигнала с первичного преобразователя давления;

расходов компонентов — объемными расходомерами;

температур компонентов — ХК—термопарами и приборами типа потенциометрических мостов;

давлений компонентов на входе в двигатель — манометрами;

давления окружающей среды — барометром или вакуумметром;

времени включения двигателя — электрическим секундомером или по осциллограмме записи сигнала с отметчика времени,

При исследовании импульсных режимов ЖРДМТ на осциллограмме регистрируются: давление в камере сгорания, давления компонентов на входе в двигатель, отметки времени, ток и напряжение на электроклапанах, в отдельных случаях — тяга. Параллельно измеряются: расходы компонентов, температуры компонентов и давление окружающей среды.

Градуировочные коэффициенты средств измерения: тяги —  $\mu_P$ , давления в камере сгорания —  $\mu_{P_k}$ , расходов компонентов —  $\mu_G$ ,  $\mu_{OK}$ , а для исследуемого двигателя известны площади среза  $F_a$  и минимального сечения  $F_M$  сопла.

Результаты всех измерений параметров двигателя до их обработки должны быть представлены в единицах СИ.

Значения параметров ЖРДМТ в непрерывных режимах определяются с использованием результатов измерений следующим образом:

тяга при противодавлении, равном давлению  $p_H$  окружающей среды,

$$P = \mu_P I_P,$$

где  $I_P$  — отклонение луча от шлейфа тяги на осциллограмме; тяга в пустоте

$$P_H = P + p_H F_a;$$

абсолютное значение давления в камере сгорания  $p_k = p_{kM} \pm \Delta p_{rP} + p_H$  — для варианта измерения манометром, где  $p_{kM}$  — показания манометра;  $\Delta p_{rP}$  — паспортная поправка манометра;

$p_k = \mu_{P_k} I_{P_k} + p_H$  — для случая определения  $p_k$  по осциллограмме, где  $I_{P_k}$  — отклонение луча от шлейфа измерения давления в камере сгорания;

массовые расходы компонентов:

$$\Delta m_G = \mu_G \Delta I_G \rho_G;$$

$$\Delta m_{OK} = \mu_{OK} \Delta I_{OK} \rho_{OK},$$

где  $\Delta I$  — разница в уровнях до и после пуска, отсчитанная по шкале уровнемера-расходомера;  $\rho$  — плотность компонента, которая в зависимости от температуры для гидразинового горючего и азотнокислотного окислителя может быть взята из табл. 2.1;

секундные массовые расходы компонентов и топлива:

$$\dot{m}_G = \frac{\Delta m_G}{\tau}; \dot{m}_{OK} = \frac{\Delta m_{OK}}{\tau}; \dot{m} = \dot{m}_G + \dot{m}_{OK},$$

где  $\tau$  — время работы двигателя в непрерывном режиме;



коэффициенты массового соотношения компонентов и избытка окислителя:

$$K_m = \frac{\dot{m}_{\text{ок}}}{\dot{m}_r}; \quad \alpha = \frac{K_m}{K_{m \text{ ст}}},$$

где  $K_{m \text{ ст}}$  — стехиометрический коэффициент соотношения компонентов, величина которого для гидразинового горючего и азотнокислотного окислителя равна 3,06;

расходный комплекс

$$\beta = \frac{p_k F_M}{\dot{m}};$$

удельный импульс тяги двигателя в условиях работы с противодавлением  $p_H$  и в пустоте соответственно:

$$I_y = \frac{P}{\dot{m}}; \quad I_{y \text{ п}} = \frac{P_{\text{п}}}{\dot{m}};$$

тяговый комплекс в пустоте:

$$K_{I_{\text{п}}} = \frac{P_{\text{п}}}{p_k F_M} = \frac{I_{y \text{ п}}}{\beta};$$

коэффициенты, характеризующие степень совершенства процессов в камере сгорания, сопле и двигателе:

$$\bar{\eta}_k = \frac{\beta}{\beta_T}; \quad \bar{\eta}_c = \frac{K_{P_{\text{п}}}}{K_{P_{\text{п}T}}}; \quad \bar{\eta}_y = \frac{I_{y \text{ п}}}{I_{y \text{ п}T}},$$

где в числителях — экспериментальные значения удельных параметров, в знаменателях — их теоретические значения, которые определяются термодинамическим расчетом и содержатся в справочниках [4]; в зависимости от измеренного  $\alpha$  для гидразинового горючего с азотно-кислотным окислителем теоретические характеристики  $\beta_T$ ,  $K_{P_{\text{п}T}}$ ,  $I_{y \text{ п}T}$  приведены в табл. 2.2 при  $p_k = 7,5 \cdot 10^5$  Па и  $p_a = 0,01 \cdot 10^5$  Па.

При обработке результатов исследования ЖРДМТ в импульсных режимах по осциллограммам определяются динамические характеристики двигателя, а величина импульса тяги, создаваемого двигателем за одно включение, позволяет оценить удельные параметры. Динамические свойства двигателя в импульсе определяются с помощью масштабного коэффициента времени  $\mu$ , который для каждой осциллограммы имеет свое значение и получается путем деления некоторого определенного интервала времени, отсчитанного по отметкам, к линейному размеру, занимаемому этим интервалом на осциллограмме.

Таблица 2.1

$t$	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	35
$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	0,801	0,798	0,796	0,794	0,793	0,790	0,788	0,786	0,784	0,782	0,780	0,778	0,774
$\rho_{ок}$ , г/см <sup>3</sup>	1,467	1,463	1,458	1,454	1,450	1,446	1,441	1,437	1,432	1,428	1,424	1,419	1,413

Таблица 2.2

$\alpha$	—	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
$\beta$ , г	Нс/кг	1360	1490	1625	1690	1730	1736	1730	1710	1680	1645	1610
$K_{рпг}$	—	2,01	1,93	1,85	1,85	1,87	1,91	1,96	2,01	2,03	2,02	2,01
$I_{пг}$ , Нс/кг	Нс/кг	2710	2820	2990	3150	3260	3340	3380	3380	3360	3300	3210

Величина импульса тяги может быть экспериментально получена, если на осциллограмме записано изменение во времени тяги или давления в камере сгорания. Во втором случае необходимо знать величину тягового комплекса и площадь  $S$  импульса давления под кривой записи  $p_k$ , которая определяется методом планиметрирования.

Удельные параметры при импульсной работе ЖРДМТ в режиме одиночных включений определяются следующим образом:

расходный комплекс

$$\beta_{од} = \frac{F_m \int p_k d\tau}{\Delta m_{п}} = \frac{F_m \bar{p}_k \bar{p}_\tau S}{\Delta m_{п}},$$

где  $\Delta m_{п}$  — расход за импульс;  $\Delta m_{п}$  определяется по методике, аналогичной для непрерывного режима;

удельный импульс тяги

$$I_{у од} = K_{рп} \beta_{од}.$$

Величина импульса тяги за одно включение двигателя определяется по формулам:

$I_{п} = \int p d\tau$  — для случая испытания с записью изменения тяги в продолжение импульса;

$I_{п} = K_{рп} F_m \int p_k d\tau = K_{рп} F_m \bar{p}_k \bar{p}_\tau S$  — для варианта записи давления в камере сгорания.

Совершенство камеры сгорания и двигателя в импульсных режимах оценивается с помощью коэффициентов  $\varphi_{к од}$  и  $\varphi_{у од}$ , равных отношению экспериментально полученных значений соответственно  $\beta_{од}$  и  $I_{у од}$  к их теоретическим значениям. Для режима одиночных включений:

$$\varphi_{к од} = \frac{\beta_{од}}{\beta_{т}}; \quad \varphi_{у} = \frac{I_{у од}}{I_{у п т}}.$$

Зависимость термодинамических характеристик  $\beta_t$  и  $I_{у п т}$  от  $\alpha$  можно оценить по табл. 2.2.

## 2.2. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА СБОРА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Действующая автоматизированная система предназначена для сбора результатов измерений в темпе испыта-

ния ЖРДМТ и первичной обработки информации с выдачей протоколов испытаний. Система создана на базе ЭВМ «Наири-К», имеющей входные и выходные шины для управления измерительными устройствами и соответствующее математическое обеспечение.

Блок—схема автоматизированной системы сбора и обработки данных при испытаниях ЖРДМТ представлена на рис. 2.1. В составе системы использованы: для ввода в ЭВМ измерительной информации — 6-канальный аналого-цифровой преобразователь АЦПК-100-11/2 и 2-канальный частотно-цифровой преобразователь, для вывода из ЭВМ на двухкоординатный графопостроитель или запоминающий электронно-лучевой осциллограф — 2-канальный цифро-аналоговый преобразователь, а также измерительно-усилительная аппаратура и устройства управления сбором информации и включением двигателя.

В темпе испытаний системой может быть преобразовано и введено в ЭВМ до 12 измерительных сигналов, в том числе 6 аналоговых, 2 частотных и 4 дискретных. Максимальная частота преобразования и ввода измерительных сигналов в ЭВМ составляет 4 кГц. Накопленная информация хранится на магнитном накопителе НМЛ-67.

Управление работой системы осуществляется либо от ЭВМ программным путем (при непрерывных режимах работы двигателя), либо от генератора импульсов (при импульсных режимах работы).

Результаты испытания выдаются в виде протоколов, содержащих до 40 параметров, к ним относятся: расходы компонентов, тяга, давление в камере сгорания, расходный комплекс, удельный импульс. Возможно также получение данных графически и на экране электронной трубки.

В качестве примера приведен протокол обработки параметров ЖРДМТ в одном из пусков с длительностью  $t_k = 0,979$  с (табл. 2.3), полученный с помощью автоматизированной системы. Обозначения параметров заданы, исходя из возможности печатающего устройства системы:  $g$  — расход компонента,  $t$  — время,  $p$  — давление,  $S$  — тяга,  $S'$  — удельный импульс,  $b$  — расходный комплекс,  $K$  — тяговый комплекс,  $l$  — показание уронемера—расходомера,  $m$  — температура,  $a$  — коэффициент избытка окислителя,  $n$  — коэффициент массового соотношения компонентов.

В течение пуска система выполнила определение перечисленных параметров через каждые 0,1 с, начиная с  $t = 0,3$  с

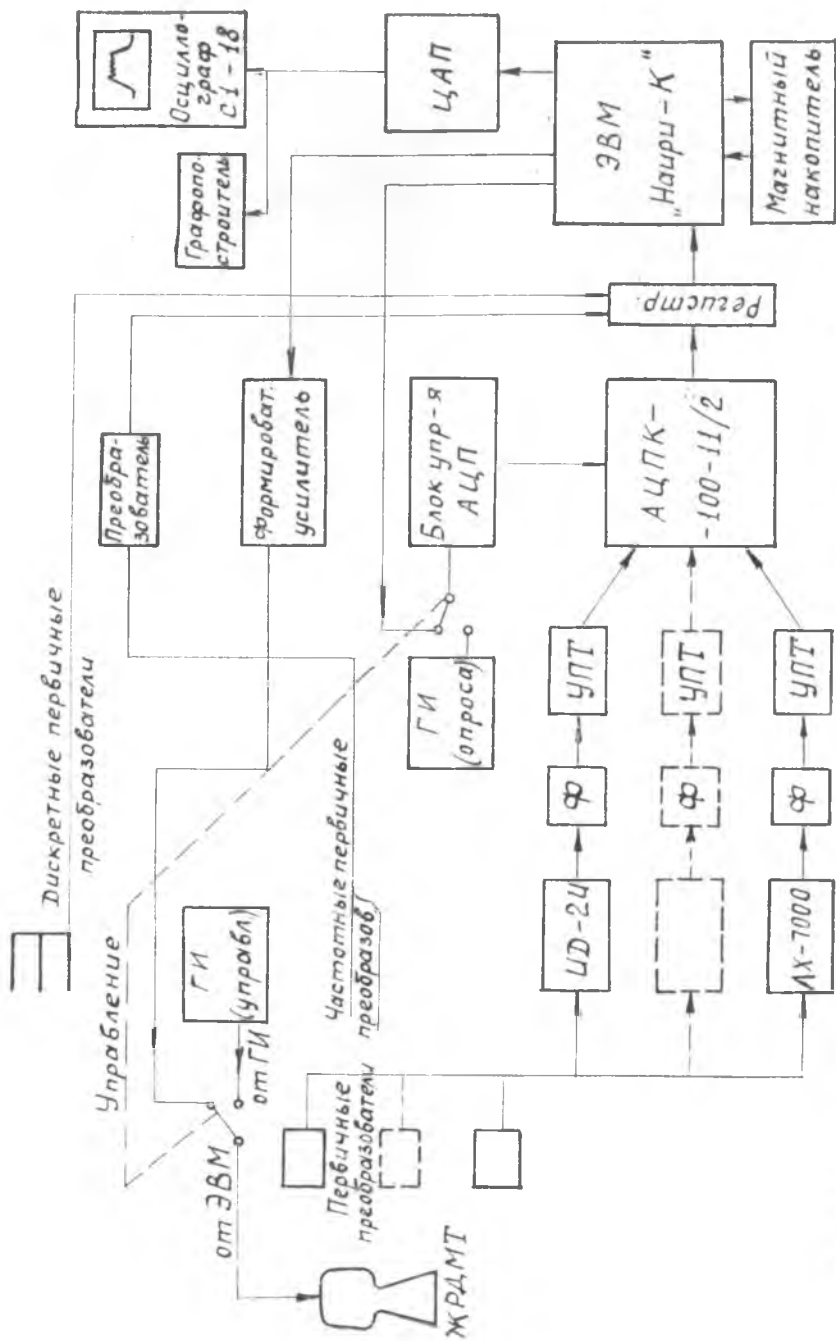


Рис. 2.1. Блок-схема автоматизированной системы сбора и обработки информации: ГИ—генератор импульсов; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ЦАП — цифро-аналоговый преобразователь; Ф — фильтр; УПТ — усилитель постоянного тока; ЭВМ — электронно-вычислительная машина

Протокол автоматизированной обработки данных в непрерывном режиме

п	т сек	рбк мм рп	рк амп	Б <sub>1</sub> кг	Б <sub>2</sub> кг	к <sub>1</sub>	к <sub>2</sub>	Б <sub>1</sub> <sup>1</sup>		Б	
								сек	сек	сек	сек
1	0,30	8,8	4,533	8,989	9,030	1,754	1,762	249,8	250,9	142,3	142,3
2	0,40	10,5	4,610	9,114	9,158	1,749	1,757	253,3	254,5	144,8	144,8
3	0,50	11,6	4,595	9,091	9,102	1,750	1,752	252,6	252,9	144,3	144,3
4	0,60	13,1	4,591	9,137	9,147	1,760	1,762	253,9	254,2	144,2	144,2
5	0,70	14,7	4,541	9,157	9,155	1,784	1,784	254,5	254,4	142,6	142,6
6	0,80	15,9	4,458	9,153	9,149	1,816	1,816	254,3	254,2	140,0	140,0

19000  
 g<sub>0</sub>=0,1191 g<sub>1</sub>=0,1312 g<sub>2</sub>=0,1252 g<sub>3</sub>=0,1308  
 k<sub>0</sub>=1,0083 k<sub>1</sub>=0,9550 k<sub>2</sub>=0,9455 k<sub>3</sub>=0,9946  
 g<sub>0</sub>=0,1256 g<sub>1</sub>=0,1316 g<sub>2</sub>=0,1253 g<sub>3</sub>=0,1386  
 t<sub>к</sub>=0,979сек  
 n=0  
 <<0>> l<sub>0</sub>=0 l<sub>к</sub>=129 m=18°c g=23,04г p=9,5 амп  
 <<г>> l<sub>0</sub>=0 l<sub>к</sub>=128 m=18°c g=12,68г p=9,5 амп  
 g=35,72г m=1,81  
 g<sub>0</sub>1=23,202г/сек g<sub>1</sub>1=12,777г/сек g<sub>1</sub>1=35,979г/сек a=0,593

после включения двигателя. Размерность результатов обработки в данном протоколе приведена в технической системе единиц.

При испытаниях ЖРДМТ в импульсных режимах приходится измерять параметры быстропеременных процессов. Сигналы о таких процессах преобразуются в дискретную форму и вводятся в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) ЭВМ через равномерные промежутки времени  $\tau_d$ , называемые периодом дискретизации. Точность отображения сигнала при этом возрастает с уменьшением  $\tau_d$ , однако, выбор слишком малого значения  $\tau_d$  нежелателен из-за увеличения объема информации, что удлиняет время ее обработки, затрудняет хранение. Поэтому при испытании ЖРДМТ величина  $\tau_d$  выбирается в зависимости от длительности включения двигателя и составляет для импульсных режимов 1 мс.

Аналого-цифровой преобразователь преобразует значение электрического сигнала с выхода измерительных приборов в число  $X$ . Перевод  $X$  в величину, соответствующую физическому значению измеряемой величины, производится по градуировочной характеристике, описываемой в данной системе полиномами второго и третьего порядка. Например, для давления в камере сгорания и тяги эти полиномы имеют вид:

$$p = ax^2 + bx + c; \quad p = ax^3 + bx^2 + cx + d,$$

где  $a, b, c, d$  — коэффициенты, значения которых определяют при градуировках.

Динамические параметры двигателя определяются интервалами времен  $\tau_i$  между характерными точками измеряемых процессов с использованием известного периода дискретизации  $\tau_d$ :

$$\tau_i = \tau_d (N_i - N_0),$$

где  $N_i$  и  $N_0$  — ячейки памяти ОЗУ, в которые занесены значения параметров, наиболее близкие к характерным точкам импульса.

Обработка данных эксперимента, необходимых для оценки экономичности двигателя в импульсных режимах, проводится ЭВМ системы по заранее составленным программам и по соответствующей методике определения удельных параметров.

Пример протокола обработки динамических показателей, энергетических характеристик и экономичности ЖРДМТ при импульсной работе, полученного с помощью автоматизирован-

Протокол автоматизированной обработки данных в импульсных режимах

3618ии зона 113 113 17-4-79г пр 37-3 реж 10-12

$x_0 = 0, 1230$

$к_0 = 0, 6057$

$n = 5$

$\lllt r \gg l = 165 m = 14^{\circ}C g = 1, 498Г p = 14amu$

$\lllt 0 \gg l = 142 m = 20^{\circ}C g = 2, 811Г p = 14amu$

$g = 4, 309г/сек n = 1, 87 a = 0, 613$

n	tk	to <sup>1</sup>		to <sup>0</sup>		t <sub>3</sub> <sup>1</sup>		t <sub>3</sub> <sup>0</sup>		t <sub>1</sub> <sup>1</sup>		t <sub>1</sub> <sup>0</sup>		t <sub>5</sub>		t <sub>6</sub>		j <sub>1</sub> <sup>1</sup>		j <sub>1</sub> <sup>0</sup>		j <sub>2</sub> <sup>1</sup>		j <sub>2</sub> <sup>0</sup>		g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>
		MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC		
2	150	10	10	10	10	11	10	151	150	11	3	117	108	72	63	0, 299	0, 559										
3	149	10	10	11	11	151	151	151	151	11	4	120	107	67	59	0, 298	0, 561										
4	149	9	9	11	11	152	152	152	152	11	3	122	112	80	71	0, 299	0, 564										

n	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>k</sub>	to <sub>1</sub>		t <sub>2</sub>		t <sub>2</sub> <sup>1</sup>		i <sub>2</sub>	i <sub>0</sub>		S	B	H
				амп	MC	амп	MC	амп	MC		амп	MC			
2	3, 22	3, 28	3, 57	29	45	15	0, 023	0, 123	0, 858	143	79	1, 87			
3	3, 30	3, 94	3, 64	29	50	16	0, 024	0, 125	0, 860	145	81	1, 88			
4	3, 38	4, 05	3, 67	30	50	15	0, 023	0, 125	0, 864	145	80	1, 88			



ной системы, приведен в виде табл. 2.4. Согласно заданной программе, в этом испытании обработке подлежали три импульса в серии из пяти включений двигателя. Параметры имеют здесь те же, что и в табл. 2.3 обозначения, кроме удельного импульса —  $S$  (он здесь без верхнего штриха).

Импульс, создаваемый двигателем за одно включение и являющийся его энергетической характеристикой, обозначен в протоколе буквой  $i$ , ток в электрических средствах измерения —  $j$ .

Автоматизированная система обеспечивает сбор и обработку данных в темпе испытаний ЖРДМТ в различных импульсных режимах: одиночных включений, установившихся и неустойчившихся.

### *2.3. СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ*

Из-за действия различных случайных факторов многократно измеренные значения того или иного параметра могут несколько различаться даже при неизменном режиме работы двигателя. Поэтому необходимо определить значение параметра, наиболее близкое к истинному, а в ходе обработки результатов из ряда измерений исключить возможные грубые ошибки. Кроме того, для ЖРД и ЖРДМТ характерно проведение испытаний на большом количестве однотипных образцов («набор статистики»), в результате чего представляется возможность оценки надежности двигателей и разброса их основных параметров. В ряде случаев необходимо определить законы распределения отклонений отдельных параметров двигателя, а также фактические величины допусков на них.

Вопросы анализа результатов эксперимента методически наиболее удачно изложены в работе [5].

#### *НЕКОТОРЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ*

В математической статистике под испытанием или опытом понимают реализацию некоторых правил, условий, действий, ведущих к получению одной или множества величин, представляющих результат эксперимента. Например, испытанием будет экспериментальное определение основных параметров двигателя.

Явления, происходящие в процессе испытания, называются событиями. Событием, например, будет возникновение тяги двигателя при заданном давлении в камере сгорания.

Событие называется случайным или возможным, если в результате данного испытания оно может как произойти, так и не произойти — например, выпадение тех или иных параметров исследуемого двигателя за пределы допуска, оговоренного в технических условиях (ТУ).

Если при испытании могут появиться несколько возможных событий и при этом нет основания предполагать, что одни события преобладают над другими, то такие события называются равновероятными. Примером равновероятных событий могут служить отклонения параметра двигателя от номинального значения в большую или меньшую сторону при симметричном законе распределения ошибок.

Вероятностью события называется отношение числа случаев, благоприятствующих наступлению данного события, к общему числу событий:  $P(A) = m/N$ , где  $P(A)$  — вероятность события  $A$ ;  $m$  — число случаев, благоприятствующих наступлению события  $A$ ;  $N$  — общее число возможных событий.

Если  $m = N$ , то  $P(A) = 1$  — событие  $A$  будет достоверным.

Если  $m = 0$ , то  $P(A) = 0$  — событие невозможно.

Случайной называется величина, которая в результате опыта может принимать то или иное значение, причем неизвестно заранее, какое именно. Примером случайной величины может служить конкретное значение удельного импульса (в пределах допуска), полученное по результатам контрольно-технологического испытания одного из двигателей данной партии.

Случайные величины обычно обозначают большими буквами, например,  $X$ . Значения случайной величины, которые она принимает в результате опыта, обозначают малыми буквами:  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . При массовых измерениях каждое из возможных значений случайной величины  $x_1, x_2, \dots, x_n$  соответственно может встречаться  $m_1, m_2, \dots, m_n$  раз. Если всего было проведено

$N$  измерений (испытаний), т. е.  $\sum_{(i)}^n m_i = N$ , то отношение  $\frac{m_i}{N}$

называют частотой или относительной частотой.

Общие количества исследуемых двигателей или выполненных измерений называются генеральными совокупностями соответственно двигателей или измерений. Если из той или

другой генеральной совокупности взято по  $N$  двигателей или измерений, то считают, что образована выборка объема  $N$ .

Если  $X$  — случайная величина, а  $x$  — некоторое ее значение, то вероятность того, что  $X < x$  равна:  $F(x) = P(X < x)$ , где  $F(x)$  — некоторая функция, называемая интегральной функцией распределения. На графике (рис. 2.2)  $F(x)$  — ордината кривой в некоторой точке  $x$ . При любом  $x$  имеем  $0 \leq F(x) \leq 1$ .

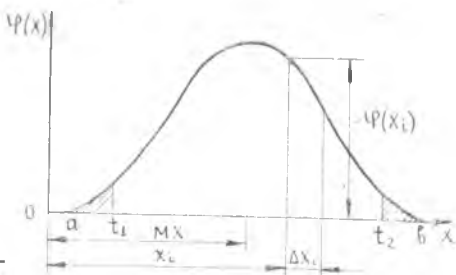
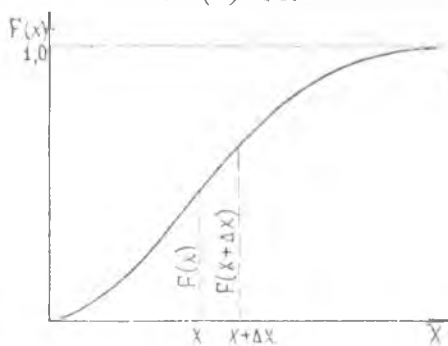


Рис. 2.2. Интегральная функция распределения

Рис. 2.3. Плотность вероятности

Плотность вероятности  $\varphi(x)$  есть предел отношения вероятности того, что случайная величина  $X$  примет значение, лежащее между  $x$  и  $x + \Delta x$ , к величине интервала  $\Delta x$  при  $\Delta x \rightarrow 0$  (рис. 2.3), т. е.  $\varphi(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(x \leq X \leq x + \Delta x)}{\Delta x}$ .

Плотность вероятности  $\varphi(x)$  и функция распределения  $F(x)$  связаны соотношением:  $F(x) = P(X < x) = P(-\infty < X < x) = \int_{-\infty}^x \varphi(x) dx$ .

Принято считать, что случайная величина задана теоретическим законом распределения, если заданы ее интегральная функция или плотность вероятности.

Случайная величина задана эмпирическим законом распределения, если для каждого значения случайной величины известна частота встречаемости или частость, полученная из  $N$  опытов (табл. 2.5).

Таблица 2.5.

Значения $X$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	...	$x_n$
Частоты	$m_1$	$m_2$	$m_3$	...	$m_n$
Частости	$m_1/N$	$m_2/N$	$m_3/N$	...	$m_n/N$

При  $N \rightarrow \infty$  имеем  $m_i/N \rightarrow P(x_i)$ , т. е. в пределе частости стремятся к вероятностям соответствующих значений случайной величины.

Всякое теоретическое распределение характеризуется двумя основными параметрами: математическим ожиданием  $MX$  (центром группирования) и дисперсией  $DX$  (величиной рассеивания).

Для дискретной случайной величины

$$MX = \sum_{i=1}^n x_i P(x_i), \quad DX = \sum_{i=1}^n P(x_i) (x_i - MX)^2.$$

Непрерывная случайная величина, заданная плотностью вероятности  $\varphi(x)$  (см. рис. 2.3), имеет следующие параметры распределения:

$$MX = \int_a^b x \varphi(x) dx, \quad DX = \int_a^b x^2 \varphi(x) dx - (MX)^2.$$

Величина  $\sqrt{DX} = \sigma$  называется средним квадратическим отклонением или стандартом.

Эмпирическое распределение характеризуется средним значением  $\bar{x}$ :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i m_i}{N} \quad \text{или} \quad \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N},$$

которое определяет центр группирования случайной величины. При достаточно большом  $N \rightarrow \infty$  выборочное значение  $\bar{x}$  эмпирического распределения стремится по величине к математическому ожиданию теоретического распределения, т. е.  $\bar{x} \approx MX$ .

Величина рассеивания выборочных значений вокруг их среднего значения оценивается эмпирической дисперсией  $S^2$ :

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n m_i (x_i - \bar{x})^2.$$

Т а б л и ц а 26

Кол-во измерений <i>N</i>	$\beta = 0,05$	$\beta = 0,02$	$\beta = 0,01$	$\beta = 0,001$
2	15,561	38,973	77,964	779,696
3	4,969	8,042	11,460	36,486
4	3,558	5,077	6,530	14,468
5	3,041	4,105	5,043	9,432
6	2,777	3,635	4,355	7,409
7	2,616	3,360	3,963	6,370
8	2,508	3,180	3,711	5,733
9	2,431	3,058	3,536	5,314
10	2,372	2,959	3,409	5,014
11	2,327	2,887	3,310	4,791
12	2,291	2,829	3,233	4,618
13	2,261	2,782	3,170	4,481
14	2,236	2,743	3,118	4,369
15	2,215	2,710	3,075	4,276
16	2,197	2,683	3,038	4,198
17	2,181	2,658	3,006	4,131
18	2,168	2,637	2,997	4,074
19	2,156	2,618	2,953	4,024
20	2,145	2,602	2,932	3,979
21	2,135	2,587	2,912	3,941
22	2,127	2,575	2,895	3,905
23	2,119	2,562	2,880	3,874
24	2,112	2,552	2,865	3,845
25	2,105	2,541	2,852	3,819
26	2,099	2,532	2,840	3,796
27	2,094	2,524	2,830	3,775
28	2,088	2,517	2,820	3,755
29	2,083	2,509	2,810	3,737
30	2,079	2,503	2,802	3,719
40	2,048	2,456	2,742	3,602
60	2,018	2,411	2,683	3,492
120	1,988	2,368	2,628	3,388

Для  $N \geq 25$  применяется формула:

$$S^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n m_i (x_i - \bar{x})^2 = a_2 - \bar{x}^2, \quad \text{где } a_2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 m_i}{N}.$$

Величина  $\sqrt{S^2} = S$  называется эмпирическим средним квадратическим отклонением, которое при  $N \rightarrow \infty$  стремится по величине к стандарту, т. е.  $S^2 \approx DX$ .

Практически предельным полем рассеивания называется расстояние между такими двумя значениями  $t_1$  и  $t_2$  случайной величины (см. рис. 2.3), при которых площадь, ограниченная кривой, осью абсцисс и отрезком  $[t_1, t_2]$ , равна  $1 - 2\beta$ , где  $2\beta$  — вероятность риска (брака). Часто принимают  $2\beta = 0,0027$ . Согласно определению можно записать:

$\int_{t_1}^{t_2} \varphi(x) dx = 1 - 2\beta$ . Определенное таким образом практически предельное поле рассеивания принимают за поле допуска.

#### ВЫЯВЛЕНИЕ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЯ

Очень часто при проведении исследований встает вопрос — отвергнуть или оставить некоторые результаты эксперимента, резко отличающиеся от остальных. Если известно, что этот результат является следствием грубой ошибки измерения, то его необходимо отбросить.

Последовательность проверки рассмотрим на примере. Имеем следующие результаты наблюдений:

1	3,68	6	5,08	11	2,81	16	4,43
2	3,11	7	2,95	12	4,65	17	3,43
3	4,76	8	6,35	13	3,27	18	3,26
4	2,75	9	3,78	14	4,08	19	2,48
5	4,15	10	4,49	15	4,51	20	4,84

Измерение 8, давшее величину 6,35, вызывает подозрение, так как заметно отличается от остальных. Проверим правильность этого подозрения.

Вычислим среднее значение из 19 остальных результатов (без значения 6,35):

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N} = \frac{72,51}{19} = 3,82.$$

Рассчитаем среднее квадратическое отклонение

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{19} (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{11,6851}{18}} = 0,784.$$

Далее, в зависимости от конкретных требований к результатам эксперимента, необходимо задаться степенью надежности нашей оценки  $\beta$ , которая обычно принимается равной 0,05; 0,02; 0,01 или 0,001. Вероятность оценки будет равна  $1-\beta$  и составит соответственно 0,95; 0,98; 0,99 или 0,999.

Задавшись величиной  $\beta = 0,01$ , по табл. 2.6 находим для  $N = 19$  значение  $t'_{\beta} = 2,953$ . Вычисляем

$$|x_{N+1} - \bar{x}| = |6,35 - 3,82| = 2,53; \quad t' S = 2,953 \cdot 0,784 = 2,315.$$

Так как  $2,53 > 2,315$ , то с вероятностью  $1-0,01$  полученное значение 6,35 нельзя считать случайным, его необходимо отбросить.

Если имеется несколько вызывающих недоверие экспериментальных данных, то необходимо определить  $\bar{x}$  и  $S$  без этих данных, а затем оценить их по приведенной схеме.

В рассмотренном критерии при расчете  $\bar{x}$  и  $S$  исключается выпадающий из ряда результат измерения, а затем делается оценка его случайности.

По другому методу, предложенному Ирвином, расчеты  $\bar{x}$  и  $S$  проводятся с использованием всех данных эксперимента, а затем определяется случайность вызывающего недоверие значения. Критерий Ирвина представляет величину  $\lambda = \frac{x_{N+1} - x_N}{S}$ , где  $x_{N+1}$  и  $x_N$  — два наибольших значения случайной величины. Функция  $\lambda$  табулирована Ирвином для различных надежностей. Ее значения приведены в табл. 2.7.

Если полученное в эксперименте значение  $\lambda$  больше значения, соответствующего, например  $\lambda_{0,95}$ , то при данном  $N$  с вероятностью 0,95 исследуемое измерение случайно; если оно меньше, то признавать случайным его нельзя, следует отбросить.

Пример. Пусть имеем результаты измерений, расположенные в возрастающем порядке: 3, 4, 5, 6, 7, 7, 8, 9, 9, 10, 11, 17.

Таблица 2.7

$N$	$\lambda_{0,95}$	$\lambda_{0,99}$
2	2,8	3,7
3	2,2	2,9
10	1,5	2,0
20	1,3	1,8
30	1,2	1,7
50	1,1	1,6
100	1,0	1,5
400	0,9	1,3
1000	0,8	1,2

Определяем среднее значение и эмпирическое среднее квадратическое отклонение для этого ряда измерений:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N} = 8,0 \text{ и } S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} = 3,71.$$

В данном примере  $x_{N+1} = 17$ ,  $x_N = 11$ .

$$\text{Определяем } \lambda = \frac{x_{N+1} - x_N}{S} = \frac{17 - 11}{3,71} = 1,6.$$

По табл. 2.7 находим, что для ближайшего  $N=10$  критерий  $\lambda_{0,95} = 1,5$ . Так как табулированное значение  $\lambda_{0,95} = 1,5$  меньше действительного  $\lambda = 1,6$ , измерение  $x_{N+1} = 17$  необходимо отбросить.

### ПОСТРОЕНИЕ ЭМПИРИЧЕСКОЙ КРИВОЙ

В ряде случаев при анализе результатов испытаний двигателей возникает необходимость построения эмпирической кривой распределения, характеризующей отклонение параметра от номинального значения. Одновременно вычисляются среднее значение исследуемого параметра  $\bar{x}$  (центр группирования) и среднее квадратическое отклонение  $S$ .

Полученные данные позволяют с заданной надежностью оценить правильность назначенного поля допуска на данный параметр или определить его.

Методику построения эмпирической кривой и вычисления ее параметров разберем на конкретном примере.

В табл. 2.8 приведены отклонения тяги однотипных двигателей от номинального значения  $P = 80$  Н при постоянном (настроечном) значении давления в камере сгорания. Эти данные получены по результатам испытания 100 двигателей.

В соответствии с ТУ точность настройки этого двигателя по тяге составляет  $\pm 3\%$ , т. е.  $\pm 2,4$  Н, а поле разброса значений тяги в пределах допуска подчиняется нормальному закону распределения.

Как видно из табл. 2.8, исследованные двигатели создают тягу, разброс значений которой укладывается в установленный допуск. Однако это не дает основания утверждать, что требования ТУ на номинальное значение тяги двигателя выполняются. Окончательное заключение может быть сделано только после соответствующей статистической обработки экспериментального материала.



Таблица 2.8

Номер двиг.	$x$	Номер двиг.	$x$	Номер двиг.	$x$	Номер двиг.	$x$	Номер двиг.	$x$
1	-0,3	21	-0,1	41	+0,8	61	+0,4	81	-1,3
2	+0,2	22	+2,4	42	+0,2	62	0	82	+0,8
3	-1,5	23	-1,1	43	-0,8	63	-0,6	83	-1,7
4	-2,3	24	+0,2	44	-1,2	64	+0,6	84	+0,3
5	+1,6	25	-0,6	45	+0,6	65	-0,4	85	-0,2
6	+0,3	26	+0,3	46	-0,4	66	-1,7	86	-0,2
7	+0,5	27	+1,3	47	-1,0	67	+0,8	87	-1,8
8	-0,2	28	+0,5	48	+1,9	68	-1,0	88	+1,1
9	-0,7	29	-0,1	49	+0,3	69	-0,8	89	+1,5
10	-1,1	30	+0,1	50	-0,1	70	+1,7	90	-0,1
11	-1,0	31	-0,2	51	+1,0	71	-1,1	91	-0,3
12	+0,1	32	-0,3	52	+0,1	72	+0,6	92	-0,6
13	-0,3	33	-0,7	53	-0,3	73	-0,4	93	+1,5
14	-0,4	34	+1,0	54	+1,2	74	-1,0	94	+0,1
15	-0,6	35	-0,4	55	+0,7	75	+1,1	95	-2,1
16	-0,8	36	0	56	-0,5	76	-1,5	96	+0,7
17	+0,9	37	-0,5	57	-0,9	77	-1,3	97	-0,1
18	+0,7	38	-0,5	58	+0,4	78	+0,1	98	-1,3
19	0	39	+0,4	59	-0,2	79	-1,2	99	0
20	+1,2	40	+0,4	60	-0,7	80	-0,1	100	-1,6

Все экспериментальные данные должны быть сгруппированы по величине отклонений от номинального значения параметра (в нашем примере — тяги). Для этой цели выписываются наибольшее и наименьшее значения исследуемого параметра. Диапазон рассеивания  $R$  равен разности между этими величинами. Найденный диапазон рассеивания делят на интервалы, число которых рекомендуется выбирать в пределах от 8 до 15.

В данном примере диапазон рассеивания принимаем равным 4,8 Н. Разделим его на 12 групп с интервалами  $h = 0,4$  Н и подсчитаем число расположенных в каждом интервале отклонений от номинального значения тяги.

В табл. 2.9 показаны пределы каждой группы отклонений, середины интервалов и прием количественного подсчета частот.

Таблица 2.9

Номер интервала	Отклонение, Н		Средина интервалов	Частоты $m_i$		Частоты $m_i/N$
	от	до		подсчет количества значений	числовое значение	
I	-2,4	-2,0	-2,2	..	2	0,02
2	-2,0	-1,6	-1,8	...	4	0,04
3	-1,6	-1,2	-1,4	┌	7	0,07
4	-1,2	-0,8	-1,0	⊠ .	11	0,11
5	-0,8	-0,4	-0,6	⊠   :	15	0,15
6	-0,4	0	-0,2	⊠ ⊠	20	0,20
7	0	+0,4	+0,2	⊠ L	16	0,16
8	+0,4	+0,8	+0,6	⊠ .	11	0,11
9	+0,8	+1,2	+1,0	┐	7	0,07
10	+1,2	+1,6	+1,4	...	4	0,04
11	+1,6	+2,0	+1,8	..	2	0,02
12	+2,0	+2,4	+2,2	..	1	0,01

Количественно попадание измеренных значений тяги (см. табл. 2.8) в установленные интервалы отмечается следующим образом:

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 ... 20  
 . . . . . | . ┌ ┐ □ ⊠ ⊠ ⊠ ⊠

Этот практический прием состоит в том, что каждое последующее число получается из предыдущего добавлением точки или отрезка прямой.

Для графического изображения эмпирических распределений строятся гистограммы или полигоны распределений.

Полигоны распределений и гистограммы могут быть построены как по частотам, так и по частостям.

Для построения полигона распределений (рис. 2.4) по оси абсцисс откладываются значения случайной величины, а по

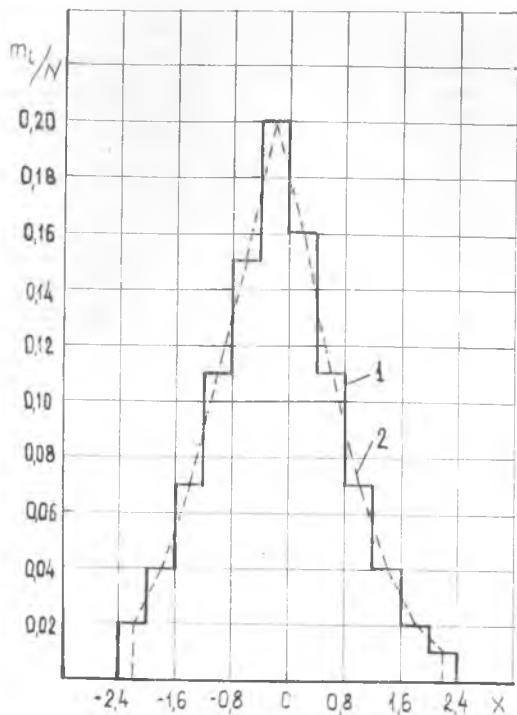


Рис. 2.4. Гистограмма (1) и полигон (2) распределения

оси ординат — величин, пропорциональных частотам. Сумма ординат равна единице.

Для построения гистограммы по оси абсцисс откладываются в выбранном масштабе интервалы: от  $-2,4$  до  $-2,0$ ; от  $-2,0$  до  $-1,6$  и т. д. По оси ординат пропорционально частотам откладываются высоты прямоугольников.

#### ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭМПИРИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

а) Объем выборки  $N > 25$ .

Последовательность вычислений рассмотрим на примере. Составляем табл. 2.10 и проводим вспомогательные вычисления, указанные в столбцах 4, 5, 6.

Таблица 2.10

1. Номер интервала	2. Середина интервала $x_i$	3. Частоты $m_i$	4. $x_i^2$	5. $m_i x_i$	6. $m_i x_i^2$
1	-2,2	2	4,84	- 4,4	9,68
2	-1,8	4	3,24	- 7,2	12,96
3	-1,4	7	1,96	- 9,8	13,72
4	-1,0	11	1,00	-11,0	11,00
5	-0,6	15	0,36	- 9,0	5,40
6	-0,2	20	0,04	- 4,0	0,80
7	+0,2	16	0,04	3,2	0,64
8	+0,6	11	0,36	6,6	3,96
9	+1,0	7	1,00	7,0	7,00
10	+1,4	4	1,96	5,6	7,84
11	+1,8	2	3,24	3,6	6,48
12	+2,2	1	4,84	2,2	4,84
$\Sigma$		100		-17,2	84,32

Вычисляем среднее значение отклонения тяги

$$\bar{x} = \frac{\Sigma m_i x_i}{\Sigma m_i} = -\frac{17,2}{100} = -0,172 \text{ Н.}$$

Вычисляем дисперсию

$$a_2 = \frac{\Sigma m_i x_i^2}{\Sigma m_i} = 0,8432 \text{ Н}^2; S^2 = a_2 - (\bar{x})^2 = 0,8432 - 0,0296 = 0,8136 \text{ Н}^2.$$

Определяем среднее квадратическое отклонение

$$S = \sqrt{0,8136} = 0,902 \approx 0,9 \text{ Н.}$$

Данная методика расчета рекомендуется для случаев, когда объем выборки задан однозначными или двузначными величинами. Если объем выборки определяется многозначным числом, то для расчета целесообразно ввести новую случайную величину  $x_i' = \frac{x_i - x_0}{h}$ , где  $h$  — величина интервала;  $x_0$  — некоторое начальное значение (обычно принимают середину среднего интервала).

б) Объем выборки  $N < 25$ .

При небольшом объеме выборки значения случайной величины делить на интервалы нецелесообразно. Среднее значение и дисперсия определяются в этом случае по формулам:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N}; \quad S^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N-1}.$$

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯ ДОПУСКА  
ПО ЭМПИРИЧЕСКОМУ РАСПРЕДЕЛЕНИЮ**

Поле допуска в эмпирическом распределении может быть установлено при условии, что известна вероятность брака  $2\beta$ . Величина  $2\beta$  назначается до эксперимента, и тогда выбранное поле допуска должно охватывать не менее  $(1 - 2\beta) \cdot 100\%$  всей площади, ограниченной генеральной кривой, полученной в эксперименте. При обработке результатов эксперимента находят такое значение  $l$ , при котором в диапазоне  $\bar{x} \pm lS$  с заданной надежностью  $P$  заключено не менее  $(1 - 2\beta) \cdot 100\%$  всей нормальной совокупности.

В табл. 2.11 приведены значения  $l$ , вычисленные для надежностей  $P = 0,9; 0,95; 0,99$  и для случаев, когда интервал  $\bar{x} \pm lS$  будет охватывать не менее 99, 73; 95 и 90% всей генеральной совокупности. Здесь  $\bar{x}$  и  $S$  — эмпирические значения среднего и среднего квадратического отклонения.

В качестве примера рассмотрим определение фактического поля допуска для выборки, представленной в табл. 2.8. Для нее получены

$$\bar{x} = -0,172; \quad S = 0,9; \quad k = N - 1 = 100 - 1 = 99,$$

где  $k$  — число степеней свободы.

Задаемся надежностью определения допуска  $P = 0,95$  и вероятностью отсутствия брака  $1 - 2\beta = 0,9973$ .

По табл. 2.11 для  $P = 0,95$ ;  $1 - 2\beta = 0,997$  и  $k = 100$  (ближайшее к нашему значению  $k$ ) находим  $l = 3,60$ .

Определяем границы поля допуска:

$$t_1 = \bar{x} - lS = -0,172 - 0,9 \cdot 3,60 = -3,21 \text{ Н}; \quad t_2 = \bar{x} + lS = -0,172 + 3,24 = +3,07 \text{ Н}.$$

Таким образом, с надежностью  $P = 0,95$  можно утверждать, что измеренное значение тяги в 99,73% всех предстоящих испытаний будет находиться (при  $p_k = \text{const}$ ) в пределах 76, 79...83, 07 Н, т. е. тяга исследуемого двигателя  $P = 80_{-3,21}^{+3,07}$  Н или  $P = 80_{-1,0\%}^{+3,8\%}$ . Из проведенного анализа следует, что

Таблица 2.11

$k=N-1$ число степеней свободы	Надежность $P = 0,9$			Надежность $P = 0,95$			Надежность $P = 0,99$		
	1 - 2 $\beta$			1 - 2 $\beta$			1 - 2 $\beta$		
	0,9973	0,95	0,9	0,9973	0,95	0,9	0,9973	0,95	0,9
4	6,76	4,18	3,51	8,26	5,11	4,29	12,80	7,92	6,64
5	6,07	3,74	3,14	7,17	4,44	3,72	10,31	6,38	5,35
6	5,60	3,47	2,91	6,50	4,02	3,38	8,91	5,51	4,62
7	5,80	3,27	2,75	6,05	3,74	3,14	8,01	4,95	4,15
8	5,07	3,13	2,63	5,72	3,54	2,97	7,38	4,56	3,83
9	4,89	3,02	2,54	5,48	3,39	2,84	6,91	4,27	3,59
10	4,75	2,94	2,47	5,28	3,26	2,74	6,55	4,05	3,40
12	4,54	2,81	2,36	4,99	3,08	2,59	6,03	3,73	3,13
14	4,39	2,72	2,28	4,78	2,96	2,49	5,67	3,52	2,95
16	4,28	2,65	2,22	4,62	2,86	2,40	5,41	3,35	2,81
18	4,19	2,59	2,17	4,50	2,79	2,34	5,21	3,22	2,70
20	4,11	2,54	2,14	4,39	2,72	2,29	5,05	3,12	2,62
25	3,98	2,46	2,07	4,20	2,61	2,19	4,76	2,94	2,47
30	3,89	2,40	2,02	4,10	2,54	2,13	4,57	2,82	2,37
40	3,78	2,33	1,95	3,94	2,44	2,05	4,31	2,67	2,24
50	3,69	2,28	1,91	3,84	2,37	1,99	4,15	2,57	2,16
60	3,63	2,25	1,89	3,76	2,33	1,96	4,05	2,50	2,10
70	3,59	2,22	1,86	3,70	2,30	1,93	3,96	2,45	2,06
80	3,55	2,20	1,85	3,66	2,27	1,91	3,90	2,41	2,02
90	3,53	2,18	1,83	3,63	2,25	1,89	3,84	2,38	2,00
100	3,51	2,17	1,82	3,60	2,23	1,87	3,80	2,35	1,98
200	3,40	2,10	1,76	3,47	2,14	1,80	3,59	2,22	1,87
300	3,35	2,07	1,74	3,41	2,11	1,77	3,50	2,17	1,82
400	3,32	2,06	1,73	3,37	2,08	1,75	3,45	2,14	1,79
500	3,30	2,05	1,72	3,35	2,07	1,74	3,41	2,12	1,78
600	3,29	2,04	1,71	3,33	2,06	1,73	3,39	2,10	1,76
800	3,27	2,03	1,70	3,30	2,05	1,72	3,36	2,08	1,75
1000	3,26	2,02	1,70	3,29	2,04	1,71	3,33	2,07	1,74

возможный фактический разброс тяги двигателей ( $-4,0... + 3,8\%$ ) несколько больше установленного ТУ ( $\pm 3\%$ ). Как видно из табл. 2.8, этот вывод сделан по выборке, в которой отсутствуют случаи выпадания тяги за пределы, оговоренные в ТУ. Отметим, что при определении поля допуска не были исключены погрешности измерения тяги.

#### *ВЫРАВНИВАНИЕ ЭМПИРИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО ТЕОРЕТИЧЕСКИМ ЗАВИСИМОСТЯМ*

При исследованиях двигателей могут решаться две практические задачи, связанные с построением функции плотности: подтверждение заранее известной функции плотности (заданного закона распределения отклонений исследуемого параметра) на основе экспериментальных данных и установление вида функции плотности по имеющимся опытным данным, когда заранее эта функция неизвестна.

Во втором случае обработка результатов наблюдений проводится в следующей последовательности:

- по опытным данным строится эмпирическая кривая;
- определяются параметры эмпирического распределения;
- выдвигается одна или несколько гипотез о функции плотности исследуемой случайной величины, исходя из вида экспериментальной кривой и значений ее параметров;

- эмпирическая кривая выравнивается по одной или последовательно по нескольким принятым теоретическим кривым;
- проводится сравнение (по одному из критериев согласия) эмпирической и теоретической кривых;
- выбирается функция, дающая наилучшее согласование.

В работе [5] приводятся графики ряда функций и рассматриваются основные признаки их встречаемости. На основании этих данных можно выбрать подходящие функции для каждого конкретно рассматриваемого случая.

При анализе результатов испытаний двигателей очень часто принимается гипотеза о нормальном законе распределения (законе Гаусса), поскольку этот закон распределения типичен для многих случайных процессов, протекающих при малых воздействиях большого числа независимых переменных, ни одно из которых не является превалирующим. В ситуациях, когда какой-либо воздействующий фактор не подчиняющийся нормальному закону, является доминирующим, принятие нормального закона неправомерно.

Общее правило выравнивания состоит в следующем. Каждое теоретическое распределение характеризуется несколькими параметрами (математическое ожидание, дисперсия и др.). Так как эти величины заранее неизвестны, их необходимо определить по эмпирическому распределению, подставить в функцию плотности вместо теоретических значений этих величин, а затем рассчитать вероятности середин всех интервалов. Умножив значения вероятностей на число опытов  $N$ , получим теоретические значения частот случайной величины, которые дают выровненную кривую.

На нашем примере проведем выравнивание эмпирического распределения по нормальному (двухпараметрическому) закону. Ранее для эмпирического распределения были определены  $\bar{x} = -0,172$  и  $S = 0,9$ .

Функция нормального распределения выражается следующей зависимостью:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}},$$

где  $a$  — математическое ожидание;  $\sigma^2$  — дисперсия.

Таблица 2.12

1 Номер интер- вала	2 Середина интервала $x_i$	3 Эмпири- ческие частоты $m_i$	4 $x_i - \bar{x}$	5 $t = \frac{x_i - \bar{x}}{S}$	6 $\varphi(t)$	7 Вероят- ность ин- тервалов $\frac{h}{S} \varphi(t)$	8 Теоретиче- ские ча- стоты $m_i'$
1	-2,2	2	-2,028	-2,26	0,0310	0,0138	1,38
2	-1,8	4	-1,628	-1,81	0,0755	0,0344	3,44
3	-1,4	7	-1,228	-1,36	0,1582	0,0705	7,05
4	-1,0	11	-0,828	-0,92	0,2613	0,116	11,60
5	-0,6	15	-0,428	-0,475	0,3564	0,163	16,30
6	-0,2	20	-0,028	-0,031	0,3988	0,177	17,70
7	+0,2	16	0,372	0,414	0,3622	0,164	16,40
8	+0,6	11	0,772	0,855	0,2768	0,1245	12,45
9	+1,0	7	1,172	1,30	0,1714	0,0765	7,65
10	+1,4	4	1,572	1,74	0,0878	0,0391	3,91
11	+1,8	2	1,972	2,20	0,0355	0,0158	1,58
12	+2,2	1	2,372	2,64	0,0122	0,0054	0,54

Σ

100



Для эмпирического распределения имеем:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} S} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2S^2}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,9} e^{-\frac{(x+0,172)^2}{2 \cdot 0,9^2}}$$

Результаты выравнивания приводятся в табл. 2.12, из которой ясен и ход расчета.

Величина  $\varphi(t)$  (столбец 6) определяется с помощью табл. 2.13 по вычисленным значениям  $t$ .

Вероятность каждого интервала (при расчетах полагаем, что все значения интервала сосредоточены в его середине) равна  $P(x_i) = \frac{h}{S} \varphi(t)$ , где  $h = 0,4$  — ширина интервала.

Умножая  $P(x_i)$  на  $N = \sum m_i = 100$ , получаем значения частот кривой, выровненной по нормальному закону (столбец 8).

Эмпирическая и выровненная кривые приведены на рис. 2.5.

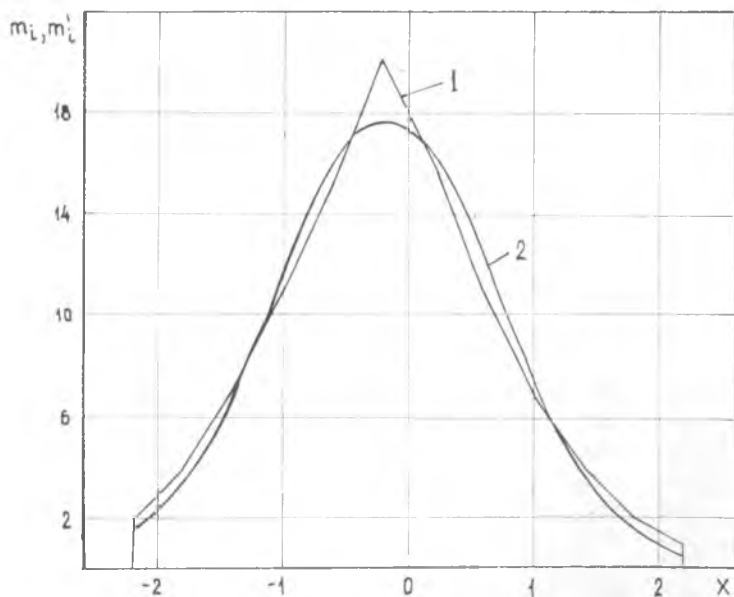


Рис. 2.5. Эмпирическая (1) и выровненная (2) кривые распределения

Таблица 2.13

$t$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,3989	3989	3989	3988	3986	3984	3982	3980	3977	3973
0,1	3970	3965	3961	3956	3951	3945	3939	3932	3925	3918
0,2	3910	3902	3894	3885	3876	3867	3857	3847	3836	3825
0,3	3814	3802	3790	3778	3765	3752	3739	3726	3712	3697
0,4	3683	3668	3653	3637	3621	3605	3589	3572	3555	3538
0,5	3521	3503	3485	3467	3448	3429	3410	3391	3372	3352
0,6	3332	3312	3292	3271	3251	3230	3209	3187	3166	3144
0,7	3123	3101	3079	3056	3034	3011	2989	2966	2943	2920
0,8	2897	2874	2850	2827	2803	2780	2756	2732	2709	2685
0,9	2661	2637	2613	2589	2565	2541	2516	2492	2468	2444
1,0	0,2420	2396	2371	2347	2323	2299	2275	2251	2227	2203
1,1	2179	2155	2131	2107	2083	2059	2036	2012	1989	1965
1,2	1942	1919	1895	1872	1849	1826	1804	1781	1758	1736
1,3	1714	1691	1669	1647	1626	1604	1582	1561	1539	1518
1,4	1497	1476	1456	1435	1415	1394	1374	1354	1334	1315
1,5	1295	1276	1257	1238	1219	1200	1182	1163	1145	1127
1,6	1109	1092	1074	1057	1040	1023	1006	989	973	957
1,7	0940	0925	0909	0893	0878	0863	0848	0833	0818	0804
1,8	0790	0775	0761	0748	0734	0721	0707	0694	0681	0669
1,9	0656	0644	0632	0620	0608	0596	0584	0573	0562	0551
2,0	0,0540	0529	0519	0508	0498	0488	0478	0468	0459	0449
2,1	0440	0431	0422	0413	0404	0396	0387	0379	0371	0363
2,2	0355	0347	0339	0332	0325	0317	0310	0303	0297	0290
2,3	0283	0277	0270	0264	0258	0252	0246	0241	0235	0229
2,4	0224	0219	0213	0208	0203	0198	0194	0189	0184	0180
2,5	0175	0171	0167	0163	0158	0154	0151	0147	0143	0139
2,6	0136	0132	0125	0126	0122	0119	0116	0113	0110	0107
2,7	0104	0101	0099	0096	0093	0091	0088	0086	0084	0081
2,8	0079	0077	0075	0073	0071	0069	0067	0065	0063	0061
2,9	0060	0058	0056	0055	0053	0051	0050	0048	0047	0046
3,0	0,0044	0043	0042	0040	0039	0038	0037	0036	0035	0034
3,1	0033	0032	0031	0030	0029	0028	0027	0026	0025	0025
3,2	0024	0023	0022	0022	0021	0020	0020	0019	0018	0018
3,3	0017	0017	0016	0016	0015	0015	0014	0014	0013	0013
3,4	0012	0012	0012	0011	0011	0010	0010	0010	0009	0009
3,5	0009	0008	0008	0008	0008	0007	0007	0007	0007	0006
3,6	0006	0006	0006	0005	0005	0005	0005	0005	0005	0004
3,7	0004	0004	0004	0004	0004	0004	0003	0003	0003	0003
3,8	0003	0003	0003	0003	0003	0002	0002	0002	0002	0002
3,9	0002	0002	0002	0002	0002	0002	0002	0002	0001	0001

**СРАВНЕНИЕ ЭМПИРИЧЕСКИХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ  
ФУНКЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТ  
ПО КРИТЕРИЯМ СОГЛАСИЯ**

Обычно считается, что эмпирическая кривая согласуется с выбранной теоретической, если вероятность согласия более 0,05. Если же эта вероятность оказывается меньше 0,05, то расхождение считается существенным и необходимо подобрать другую теоретическую кривую.

Сравнение эмпирического и теоретического распределения выполнено по двум общепризнанным критериям.

*а) Критерий согласия Пирсона  $\chi^2$*

По сравнению с другими критериями этот критерий позволяет свести к минимуму возможность неверной оценки степени соответствия подобранной кривой имеющемуся экспериментальному распределению, причем эффективность критерия  $\chi^2$  возрастает с увеличением числа измерений.

Последовательность вычислений при использовании критерия ясна из табл. 2.14 и пояснений к ней.

В столбцах 2 и 3 приведены соответственно эмпирические и теоретические значения частот. До начала вычислений необ-

Таблица 2.14

1 Номер интервала	2 $m_i$	3 $m_i'$	4 $ m_i - m_i' $	5 $ m_i - m_i' ^2$	6 $\frac{ m_i - m_i' ^2}{m_i'}$	
1	2	1,38	4,82	1,18	1,39	0,289
2	4	3,44				
3	7	7,05	0,05	0,0025	0,0003	
4	11	11,60	0,60	0,36	0,031	
5	15	16,30	1,30	1,69	0,103	
6	20	17,70	2,30	5,29	0,299	
7	16	16,40	0,40	0,16	0,0098	
8	11	12,45	1,45	2,10	0,169	
9	7	7,65	0,65	0,42	0,055	
10	4	3,91	6,03	0,97	0,942	0,156
11	2	1,58				
12	1	0,54				
$\Sigma$	100				1,112	

ходимо сгруппировать частоты, которые встречаются реже 5 раз. Таких групп в нашем примере две: в смежных интервалах 1—2 и 10—12.

$$\text{Вычисляется значение } \chi^2 = \sum_{i=1}^g \frac{|m_i - m_i'|^2}{m_i'} = 1,112.$$

Затем определяется число степеней свободы  $k = n - r - 1$ , где  $n$  — число сравниваемых частот (при учете редко встречающихся сгруппированных частот считается, что внутри каждой группы собраны результаты измерения одной частоты, т. е. в нашем примере две такие группы дают и две сравниваемые частоты; при подсчете  $n$  к этим двум частотам нужно добавить количество интервалов, в которых  $m_i > 5$ );  $r$  — число параметров теоретической функции распределения.

В рассматриваемом случае  $n = 9$ ,  $r = 2$ , так как нормальный закон распределения является двухпараметрическим.

$$\text{Тогда } k = 9 - 2 - 1 = 6.$$

Далее из табл. 2.15 находим, что для  $k = 6$  и  $\chi^2 = 1,112$  ближайшее значение  $P(\chi^2) = 0,98$ , т. е. кривые согласуются.

#### б) Критерий Колмогорова $\lambda$

Вопрос о соответствии подобранной функции и эмпирического распределения по критерию Колмогорова решается сравнением их параметров, причем этот критерий дает несколько завышенную оценку степени соответствия распределений.

В качестве иллюстрации того, как осуществляется проверка соответствия теоретического распределения результатам эксперимента с помощью критерия Колмогорова, используем наш пример — табл. 2.16, в которую сведены результаты вычисления.

В столбцах 4 и 5 приведены суммы, которые образуются путем прибавления последующих частот к сумме предыдущих. Затем определяется разность между накопленными теоретическими и эмпирическими суммами (столбец 6), и выявляется максимальное значение этой разности.

В нашем случае эта наибольшая разность равна 1,53.

Далее определяем  $D_{\max} = \frac{1,53}{N} = \frac{1,53}{100} = 0,0153$ , где  $N = \sum m_i = 100$ .

Критерий  $\lambda$  оценивается по формуле  $\lambda = D_{\max} \sqrt{N} = 0,0153 \sqrt{100} = 0,153$ .

Таблица 2.15

$\gamma^2$ \ k	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0,6065	0,8013	0,9098	0,9626	0,9856	0,9948	0,9982	0,9994	0,9998	0,9999	1	1
2	3679	5724	7358	8491	9197	9598	9810	9915	9963	9985	0,9994	0,9998
3	2231	3016	5578	7000	8088	8850	9344	9643	9814	9907	9955	9979
4	1353	2615	4060	5494	6767	7798	8751	9114	9473	9699	9834	9912
5	0821	1718	2873	4159	5438	6600	7576	8343	8912	9312	9580	9752
6	0498	1116	1991	3062	4232	5398	6472	7309	8153	8734	9161	9462
7	0302	0719	1359	2206	3208	4289	5366	6371	7254	7991	8576	9022
8	0183	0460	0916	1562	2381	3326	4335	5341	6288	7133	7851	8436
9	0111	0293	0611	1091	1736	2527	3423	4373	5321	6219	7029	7729
10	0067	0186	0404	0752	1247	1886	2650	3505	4405	5304	6160	6939
11	0041	0117	0266	0514	0884	1386	2017	2757	3575	4433	5289	6108
12	0025	0074	0174	0348	0620	1006	1512	2133	2851	3626	4957	5276
13	0015	0046	0113	0234	0430	0721	1119	1625	2237	2933	3690	4478
14	0009	0029	0073	0156	0296	0512	0818	1233	1730	2330	3007	3738
15	0006	0018	0047	0104	0203	0360	0591	0909	1321	1825	2414	3074
16	0003	0011	0030	0068	0138	0251	0424	0669	0996	1411	1912	2491
17	0002	0007	0019	0045	0093	0174	0301	0487	0744	1079	1496	1993
18	0001	0004	0012	0029	0062	0120	0212	0352	0550	0816	1157	1575
19	0001	0003	0008	0019	0042	0082	0149	0252	0403	0611	0885	1231
20	0000	0002	0005	0013	0028	0056	0103	0179	0293	0453	0671	0952
21	0000	0001	0003	0008	0018	0038	0071	0126	0211	0334	0504	0729
22	0000	0001	0002	0005	0012	0025	0049	0089	0151	0244	0375	0554
23	0000	0000	0001	0003	0008	0017	0034	0062	0107	0177	0277	0417
24	0000	0000	0001	0002	0005	0011	0023	0043	0076	0127	0203	0311
25	0000	0000	0001	0001	0003	0008	0016	0030	0053	0091	0148	0231
26	0000	0000	0000	0001	0002	0005	0010	0020	0037	0065	0107	0170
27	0000	0000	0000	0001	0001	0003	0007	0014	0026	0046	0077	0121
28	0000	0000	0000	0000	0001	0002	0005	0010	0018	0032	0055	0090
29	0000	0000	0000	0000	0001	0001	0003	0006	0012	0023	0039	0065
30	0000	0000	0000	0000	0000	0001	0002	0004	0009	0016	0028	0047

Таблица 2.16

1 Номер интервала	2 $m_i$	3 $m_i'$	4 $m_i$ (накопл.)	5 $m_i'$ (накопл.)	6 $m_i$ (накопл.) — $m_i'$ (накопл.)
1	2	1,38	2	1,38	+0,62
2	4	3,44	6	4,82	+1,18
3	7	7,05	13	11,87	+1,13
4	11	11,60	24	23,47	+0,53
5	15	16,30	39	39,77	—0,77
6	20	17,70	59	57,47	+1,53
7	16	16,40	75	73,87	+1,13
8	11	12,45	86	86,32	—0,32
9	7	7,65	93	93,97	—0,97
10	4	3,91	97	97,88	—0,88
11	2	1,58	99	99,46	—0,46
12	1	0,54	100	100	0
$\Sigma$	100				

Пользуясь табл. 2.17 для данного  $\lambda$ , находим  $P(\lambda)$  — вероятность того, что теоретическая функция выбрана правильно. Для  $\lambda = 0,153$  имеем  $P(\lambda) \approx 1$ , т. е. эмпирическая и теоретическая кривые согласуются хорошо.

Таблица 2.17

$\lambda$	$P(\lambda)$	$\lambda$	$P(\lambda)$
0,30	1,000	1,00	0,2700
0,35	0,9997	1,10	0,1777
0,40	0,9972	1,20	0,1122
0,45	0,9874	1,30	0,0681
0,50	0,9639	1,40	0,0397
0,55	0,9228	1,50	0,0222
0,60	0,8643	1,60	0,0120
0,65	0,7920	1,70	0,0062
0,70	0,7112	1,80	0,0032
0,75	0,6272	1,90	0,0015
0,80	0,5441	2,00	0,0007
0,85	0,4653	2,10	0,0003
0,90	0,3927	2,20	0,0001
0,95	0,3275	2,30	0,0001
		2,40	0,0000
		2,50	0,0000

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТА

Методы математической статистики составляют теоретические основы обработки и анализа результатов испытаний двигателей.

Статистический анализ полученной при испытаниях двигателя информации по каждому измеренному параметру заключается в следующем:

анализируются экспериментальные данные с целью исключения грубых ошибок;


строится эмпирическая кривая распределения исследуемого параметра (гистограмма или полигон) и вычисляются параметры эмпирического распределения;

определяется гарантированное поле допуска исследуемого параметра по эмпирическому распределению;

определяется и строится функция плотности вероятности эмпирического распределения;

сравниваются эмпирическая и теоретическая функции распределения частот по одному из критериев согласия.

После проведения такого анализа экспериментальные данные могут быть использованы для косвенного определения производных параметров, по которым оценивается экономичность и степень совершенства двигателя, а также для получения комплекса характеристик двигателя в различных режимах работы.



### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЖРДМТ

---

#### 3.1. ХАРАКТЕРИСТИКА ПО СОСТАВУ ТОПЛИВА

Жидкостный ракетный двигатель рассчитывается на некоторый определенный состав топлива, отвечающий номинальным значениям давлений  $p_{вхг}$  и  $p_{вхок}$  компонентов на входе в камеру двигателя. В условиях эксплуатации возможно отклонение значений  $p_{вхг}$  и  $p_{вхок}$  от номинальных, что может привести к изменению состава топлива и, как следствие, — параметров работы двигателя.

Существенное изменение состава топлива наблюдается в двигателях, имеющих низкие значения давлений  $p_{вхг}$  и  $p_{вхок}$ . Обычно это двигатели с вытеснительной системой подачи топлива. К ним относятся и ЖРДМТ.

Характеристика или зависимость тяги и удельных параметров двигателя от состава топлива определяется при неизменных давлении в камере сгорания и условиях окружающей среды.

#### ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СОСТАВА ТОПЛИВА

Состав топлива, определяющий его теплотворную способность, температуру, молекулярную массу и состав продуктов сгорания, может быть задан коэффициентом массового соотношения компонентов  $K_m$ , который представляет отношение массовых секундных расходов окислителя и горючего:  $K_m = \dot{m}_{ок} / \dot{m}_г$ .

Для каждого топлива некоторому определенному значению коэффициента  $K_m$  соответствует наибольший тепловой эффект реакции (наибольшая теплотворная способность). Такое соотношение компонентов, определяемое коэффициентом  $K_{mст}$ ,



называется стехиометрическим. При этом в топливной смеси содержится ровно столько окислительных элементов, сколько необходимо для полного, т. е. с использованием высших валентностей, окисления всех горючих элементов. Для углеводородного горючего и окислителя, содержащего в качестве окислительного элемента кислород, стехиометрической смеси соответствуют следующие реакции:  $C + O_2 = CO_2$ ;  $2H_2 + O_2 = 2H_2O$  (азот при достижимых в камерах сгорания ЖРД температурах участия в реакциях не принимает). Для этих реакций в соответствии с молекулярными массами имеем:



т. е. на 1 кг каждого горючего элемента требуется кислорода:



В каждом килограмме компонента, общая химическая формула которого  $(C_{b_c} H_{b_H} O_{b_O} N_{b_N})_r$ , ок содержатся следующие количества элементов:

$$q_c = \frac{\mu_c b_c}{\mu_c b_c + \mu_H b_H + \mu_O b_O + \mu_N b_N} = \frac{\mu_c b_c}{\mu_k};$$

$$q_H = \frac{\mu_H b_H}{\mu_k}; \quad q_O = \frac{\mu_O b_O}{\mu_k}; \quad q_N = \frac{\mu_N b_N}{\mu_k},$$

причем  $q_c + q_H + q_O + q_N = 1$  (кг).

Здесь  $\mu$  — атомные массы элементов (С, Н, О, N);  $b$  — число атомов элементов в химических формулах компонентов;  $\mu_k$  — молекулярная масса компонента.

Кислород топлива расходуется на окисление горючих элементов, содержащихся в основном в горючем и, возможно, — в самом окислителе. Тогда стехиометрический коэффициент массового соотношения компонентов определяется выражением

$$K_{т.ст} = \frac{(8/3 q_c - 8 q_H - q_O)_r}{(q_O - 8/3 q_c - 8 q_H)_{ок}},$$

где числитель показывает потребность в кислороде для полного сжигания 1 кг горючего, знаменатель — свободное количество кислорода в 1 кг окислителя.

Значение  $K_{m \text{ ст}}$  может быть определено также по формуле замещения валентностей элементов:

$$K_{m \text{ ст}} = \frac{\mu_{\text{ок}} \sum_{i=1}^n b_{i \text{ г}} \nu_i}{\mu_{\text{г}} \sum_{i=1}^n b_{i \text{ ок}} \nu_i} .$$

где  $\mu_{\text{ок}}$ ,  $\mu_{\text{г}}$  — молекулярные массы окислителя и горючего;  $n$  — количество химических элементов в топливе;  $b_{i \text{ г}}$ ,  $b_{i \text{ ок}}$  — число атомов  $i$ -го химического элемента в эквивалентных формулах горючего и окислителя;  $\nu_i$  — полная валентность  $i$ -го химического элемента.

Необходимо отметить, что значения коэффициента  $K_{m \text{ ст}}$  для различных топлив могут существенно отличаться друг от друга. Так, для топлива  $\text{N}_2\text{H}_4 + \text{O}_2$  коэффициент  $K_{m \text{ ст}}$  равен 0,988, для топлива  $(\text{CH}_3)_2\text{N}_2\text{H}_2 + \text{N}_2\text{O}_4$  — 3,06, для топлива  $\text{H}_2 + \text{O}_2$  — 8, для топлива  $\text{H}_2 + \text{F}_2$  — 19.

При отклонении значения  $K_m$  от стехиометрического тепловой эффект реакции горения топлива уменьшается, что объясняется наличием в смеси избыточных (не принимающих участие в химическом взаимодействии) окислительных (при  $K_m > K_{m \text{ ст}}$ ) или горючих (при  $K_m < K_{m \text{ ст}}$ ) элементов.

Если бы в результате горения топлива действительно образовывались только продукты полного окисления, то составу топлива, соответствующему  $K_{m \text{ ст}}$ , отвечала бы максимальная температура горения. Причем она могла бы достигать чрезвычайно высоких значений. Так, для стехиометрической смеси  $\text{H}_2$  и  $\text{O}_2$  температура горения составляла бы 7250 К.

Но, как показывают термодинамические расчеты, реально максимальные температуры горения жидких ракетных топлив не превышают 3500...4500 К, поскольку при температурах выше 2500...3000 К становится существенной диссоциация продуктов сгорания, протекающая с затратой энергии. При этом наряду с «обратными» реакциями разложения  $2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{H}_2 + \text{O}_2$  и  $2 \text{CO}_2 \rightarrow 2 \text{CO} + \text{O}_2$  в диссоциации большую роль играют реакции с образованием свободных атомов и радикалов:  $\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}$ ;  $\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H} + \text{OH}$ ;  $\text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{O}$ . Диссоциация приводит не только к снижению температуры горения, но и к смещению максимума температуры, причем для большинства топлив в область значений коэффициента  $K_m < K_{m \text{ ст}}$  (кривые на рис. 3.1).

Степень диссоциации продуктов сгорания при данном  $K_m$  зависит от давления в камере сгорания  $p_k$  — при повышении давления количество диссоциированных продуктов уменьшается, а температура горения увеличивается. При этом значение коэффициента  $K_m$  для максимума температуры приближается к  $K_{m,ст}$ . С увеличением или уменьшением коэффициента  $K_m$  (по сравнению с его оптимальным значением) температура продуктов сгорания непрерывно уменьшается.

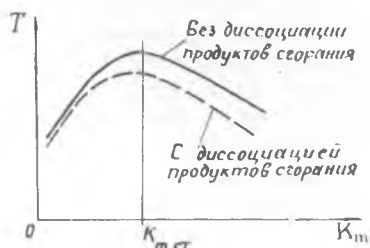


Рис. 3.1. Зависимость температуры горения от коэффициента массового соотношения компонентов

Для определения состава топлива наряду с коэффициентом массового соотношения компонентов  $K_m$  широко

используется так называемый коэффициент избытка окислителя  $\alpha = K_m/K_{m,ст}$ , показывающий степень отклонения действительного соотношения компонентов от стехиометрического.

Очевидно, в случае стехиометрического состава топлива коэффициент  $\alpha = 1$ ; при  $\alpha < 1$  в смеси имеется избыток горючих элементов, при  $\alpha > 1$  — окислительных.

Коэффициент избытка окислителя особенно удобен для сравнения термодинамических характеристик различных топлив.

*Расчетные зависимости.* От состава топлива, задаваемого коэффициентами  $\alpha$  или  $K_m$ , зависят его энергетические показатели и, следовательно, возможное значение удельного импульса тяги  $I_y$ , определяемого по формуле

$$I_y = \frac{P}{\dot{m}} = \omega_a + \frac{(p_a - p_n) F_a}{\dot{m}}$$

где  $P$  — тяга;  $\dot{m}$  — секундный массовый расход топлива;  $F_a$  — площадь среза сопла;  $p_a$  — давление на срезе сопла;  $p_n$  — давление окружающей среды;  $\omega_a$  — скорость продуктов сгорания на срезе сопла.

Значение  $I_y$  определяется в основном величиной скорости  $\omega_a$ , причем характер изменения  $I_y = f(\alpha)$  аналогичен изме-

нению зависимости  $\omega_a = f(\alpha)$ . Формула для определения скорости имеет вид:

$$\omega_a = \sqrt{\frac{n}{n-1} R_k T_k \left[ 1 - (p_a/p_k)^{\frac{n-1}{n}} \right]},$$

где  $n$  — средний показатель изэнтропы расширения;  $R_k$  — удельная газовая постоянная. Видно, что при определенном значении  $p_a/p_k$  скорость истечения  $\omega_a$  и, соответственно, удельный импульс тяги зависят от параметров рабочего тела в камере сгорания ( $T_k$ ,  $R_k$ ) и от величины  $n$ , характеризующей эффективность преобразования тепловой энергии в сопле в кинетическую. Изменение величин  $T_k$ ,  $R_k$  и  $n$  в зависимости от коэффициента  $\alpha$  различно (рис. 3.2), поэтому  $\alpha_m$ , соответствующий максимальному значению удельного импульса  $I_y$ , обычно не совпадает со значением коэффициента  $\alpha$ , отвечающим максимальной температуре горения. Однако зависимости  $I_y = f(\alpha)$  и  $T_k = f(\alpha)$  имеют качественно одинаковый характер. Для большей части топлив, используемых в настоящее время, максимум  $I_y$  лежит в диапазоне значений  $\alpha = 0,7 \dots 0,95$ , хотя, например, для топлива  $H_2 + O_2$  удельному импульсу тяги  $I_{y \max}$  соответствует  $\alpha = 0,4$ . Зависимости  $I_y = f(\alpha)$  индивидуальны для каждой топливной пары, причем даже для конкретного топлива значения  $I_y = f(\alpha)$  существенно зависят от давления  $p_k$  и степени расширения продуктов сгорания  $p_k/p_a$ .

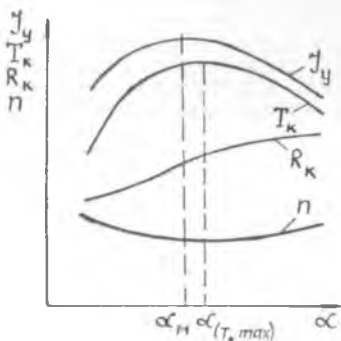


Рис. 3.2. Зависимости температуры  $T_k$ , удельной газовой постоянной  $R_k$  и среднего показателя изэнтропы  $n$  от коэффициента избытка окислителя

В литературе приведены детальные расчеты энергетических характеристик термодинамических и теплофизических свойств продуктов сгорания двухкомпонентных жидких ракетных топлив в широком диапазоне значений коэффициента  $\alpha$  с учетом различных факторов, определяющих рабочий процесс в ЖРД [4].

Расчетные формулы, характеризующие зависимости удельного импульса тяги  $I_y$  и других энергетических параметров в функции от коэффициента избытка окислителя, полученные

для случая полного тепловыделения и равновесности состава в камере сгорания, а также равновесности процесса расширения продуктов сгорания, определяют предельные (идеальные) характеристики ЖРД по составу топлива. Для конкретного двигателя (если известна площадь минимального сечения  $F_m$  и степень расширения сопла  $F_a = F_a/F_m$ ) легко можно получить идеальную зависимость тяги  $P = \dot{f}(\alpha)$ . Для этого по данным термодинамического расчета определяется значение удельной площади  $\dot{j}_m = F_m/\dot{m}$ , по которой получают расход топлива  $\dot{m}$ . Тяга двигателя определяется по формуле  $P = \dot{m} I_{yT}$ .

Реальная характеристика ЖРД по составу топлива из-за несовершенства рабочих процессов, происходящих в камере двигателя, отличается от идеальной, причем наиболее значительны эти отличия для ЖРДМТ. Расчетное определение реальной характеристики для ЖРДМТ в настоящее время не представляется возможным. Единственный способ определения этой характеристики — экспериментальный.

В то же время идеальные зависимости параметров ЖРДМТ от состава топлива дают достаточно достоверное представление об относительном изменении параметров ЖРДМТ и могут быть поэтому использованы при проектировании двигателей.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Экспериментально характеристика ЖРДМТ по составу топлива может быть получена на высотной установке, разрежение в вакуумной камере которой обеспечивает безотрывное течение продуктов сгорания в сопле. Для получения характеристики проводятся 4...6 огневых пусков двигателя продолжительностью 2...4 с. Изменение коэффициента  $\alpha$  обеспечивается варьированием давлений на входе  $p_{вхг}$  и  $p_{вхок}$  от номинального значения. При этом заранее подбираются значения давлений  $p_{вхг}$  и  $p_{вхок}$ , обеспечивающие в заданном диапазоне примерное равенство в каждом пуске.

В процессе испытаний с помощью методов, описанных в разделе 1.2 данного пособия, на каждом режиме производится измерение тяги, объемных расходов компонентов, давления в камере сгорания, давления в вакуумной камере, продолжительности включения двигателя. При обработке результатов эксперимента значения параметров работы двигателя приводятся к пустотным условиям.

В случае отклонения давления  $p_k$  от значения, полученного при номинальном коэффициенте  $\alpha$ , для определения зависимости  $P_{п} = j(\alpha)$  необходимо экспериментальное значение пустотной тяги  $P'_{п}$  на данном режиме скорректировать согласно выражению  $P_{п} = P'_{п} \frac{p_k}{p'_k}$ , где штрих обозначает параметр, полученный при отклонении  $p_k$  от номинального значения.

Влияние отклонений  $p_k$  на значение удельного импульса тяги  $I_{уп}$  мало, поэтому при рассмотрении характеристики его можно не принимать во внимание.

### СРАВНЕНИЕ ИДЕАЛЬНОЙ И РЕАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИК

Отклонение реальной характеристики ЖРДМТ по составу топлива от идеальной связано с особенностями процессов в камере сгорания двигателя. Известно, что удельный импульс тяги можно представить следующим образом:

$$I_{уп} = \beta \cdot K_{P_{п}}, \quad (3.1)$$

где  $\beta$  — расходный комплекс;  $K_{P_{п}}$  — тяговый комплекс.

Расходный комплекс выражается в виде

$$\beta = \frac{\sqrt{R_k T_k}}{\mu_c \sqrt{n \left( \frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n+1}{n-1}}}} = \frac{p_k F_M}{\dot{m}}, \quad (3.2)$$

где  $\mu_c$  — коэффициент расхода сопла.

Как следует из (3.2), величина  $\beta$  характеризует свойства рабочего тела и является удельным энергетическим параметром камеры сгорания. В то же время расходный комплекс легко определяется экспериментально.

Тяговый комплекс — величина безразмерная, характеризующая вклад сопла в создаваемую тягу ( $n$  — удельный импульс тяги) двигателя. Его значение в эксперименте определяется по формуле  $K_{P_{п}} = P_{п} / p_k F_M$ .

Идеальные значения расходного  $\beta_T$  и тягового  $K_{P_{пT}}$  комплексов для данного топлива находятся из термодинамического расчета. На рис. 3.3 приведены типичные зависимости величин  $I_{упT}$ ,  $\beta_T$ ,  $K_{P_{пT}}$  от коэффициента избытка окислителя  $\alpha$ . Из рисунка видно, что характер изменения комплекса  $\beta_T = j(\alpha)$  близок к изменению  $I_{упT}$ , однако максимум расходного комплекса смещен в сторону меньших значений коэф-

фициента  $\alpha$  (это типично для топлив, у которых стехиометрический коэффициент  $K_{m\text{ст}} < 1$ ). Зависимость  $K_{P\text{пт}} = f(\alpha)$  имеет обычно весьма сложный характер и неодинакова для различных топлив.

Совершенство процессов преобразования топлива в камере сгорания (тепловыделения) и расширения продуктов сгорания в сопле можно оценить с помощью коэффициентов камеры сгорания  $\varphi_k$  и сопла  $\varphi_c$ . Считая, что в камере сгорания ЖРДМТ потери полного давления отсутствуют, коэффициенты  $\varphi_k$  и  $\varphi_c$  определяют на основе эксперимента и данных термодинамического расчета из выражений:

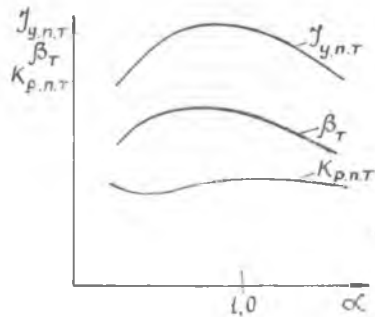


Рис. 3.3. Зависимости идеальных значений пустотного удельного импульса тяги  $I_{y\text{пт}}$ , расходного комплекса  $\beta_{\tau}$  и тягового комплекса  $K_{P\text{пт}}$  от коэффициента избытка окислителя

$$\varphi_k = \mu_c \frac{\beta}{\rho_{\tau}}; \quad (3.3) \quad \varphi_c = \frac{K_{P\text{пт}}}{\mu_c K_{P\text{пт}}} \quad (3.4)$$

В уравнениях (3.3) и (3.4) коэффициент расхода для конкретного двигателя можно считать постоянным  $\mu_c = \text{const}$  на всех режимах работы. Очевидно, реально зависимость  $I_{y\text{пт}} = f(\alpha)$  имеет вид:

$$I_{y\text{пт}} = \varphi_k \varphi_c I_{y\text{пт}}$$

Для ЖРДМТ характерно существенное (по сравнению с идеальным случаем) снижение эффективности процессов как в камере сгорания, так и в сопле. При этом коэффициент камеры сгорания может изменяться в весьма широких пределах —  $\varphi_k = 0,7 \dots 0,95$ ; возможный диапазон изменения коэффициента сопла более узок —  $\varphi_c = 0,85 \dots 0,95$  (с уменьшением размерности ЖРДМТ значения коэффициентов  $\varphi_k$  и  $\varphi_c$  обычно снижаются).

Показатели эффективности процессов в камере ( $\varphi_c$ ,  $\varphi_k$ ) у ЖРДМТ значительно ниже, чем у ЖРД больших тяг. Причиной снижения коэффициента  $\varphi_k$  является прежде всего крупномасштабная неравномерность соотношения компонентов в

поперечном сечении камеры, а также относительно низкая полнота горения из-за малого пути турбулентного смешения. Необходимо отметить, что при отклонении коэффициента  $\alpha$  от номинального значения коэффициент  $\varphi_k$  обычно несколько уменьшается из-за изменения условий жидкофазного смешения компонентов. Снижение коэффициента  $\varphi_c$  объясняется в основном существенной химической неравновесностью процесса расширения рабочего тела (процесс близок к «замороженному») и высоким уровнем потерь на трение из-за низких чисел  $Re$ , характерных для сопл ЖРДМТ. При этом вид зависимости  $K_{pн} = f(\alpha)$  может резко отличаться от идеального случая из-за несоответствия реального состава рабочего тела на входе в сопло составу, принимаемому в термодинамическом расчете.

Таким образом, для ЖРДМТ типично значительное уменьшение величины удельного импульса тяги, причем вид зависимости  $I_{yн} = f(\alpha)$  индивидуален для каждого типа двигателя. В то же время в ЖРДМТ имеются возможности увеличения  $I_{yн}$ , которые прежде всего связаны с улучшением полноты сгорания (и повышением коэффициента  $\varphi_k$ ) за счет улучшения системы смесеобразования и использования камер сгорания из тугоплавких материалов. Повышение же коэффициента сопла  $\varphi_c$  даже при выборе оптимальной степени расширения  $\bar{F}_a$  лимитировано из-за действия чисто физических факторов.

Зависимость  $P_n = f(\alpha)$ , полученная в эксперименте, обычно гораздо меньше отличается от идеальной, чем соответствующая зависимость для удельного импульса. Это объясняется отсутствием влияния полноты выделения тепла в камере сгорания ( $\varphi_k$ ) на тягу при данном давлении  $p_k$ . Разница между идеальными и реальными значениями тяг ЖРДМТ обусловлена только влиянием коэффициентов  $\varphi_c = f(\alpha)$  и  $\mu_c < 1$ .

### 3.2. СТАТИЧЕСКИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

*Дроссельная характеристика ЖРД*, являющаяся важнейшей регулировочной характеристикой, представляет зависимости силы тяги и удельного импульса тяги от давления в камере сгорания (или от секундного массового расхода топлива) при неизменных соотношении компонентов и давлении окружающей среды.



Дроссельная характеристика для двигателя, работающего в пустоте, может быть определена из уравнений:

$$P_n = \dot{m} \omega_a + p_a F_a;$$

$$I_{y n} = \omega_a + \frac{p_a F_a}{\dot{m}}. \quad (3.5)$$

Дроссельную характеристику обычно получают в виде зависимости тяги и удельного импульса от давления в камере сгорания (а не от расхода топлива), так как давление в камере сгорания нагляднее характеризует изменение режима работы двигателя и точнее может быть измерено при испытаниях. Установим связь между расходом топлива и давлением в камере сгорания, используя понятие о расходном комплексе:  $\bar{m} = \frac{F_M}{\beta} p_k$ .

Будем считать эффективность рабочего процесса в камере сгорания на всех режимах неизменной ( $\eta_k = \text{const}$ ). При этом допущении комплекс  $\beta$  можно принять постоянным, и тогда секундный расход топлива будет прямо пропорционален давлению в камере сгорания:

$$\bar{m} = A p_k. \quad (3.6)$$

Сделаем также обычные допущения о постоянстве  $\eta_c$  и  $K_{p n}$ , что позволит определить постоянство на всех режимах  $\omega_a$  и  $p_k/p_a$ . Тогда, подставив в уравнение (3.5) значение  $\dot{m}$  из уравнения (3.6), получим

$$P_n = A p_k \omega_a + p_a F_a = \left( A \omega_a + \frac{F_a}{p_k/p_a} \right) p_k = B p_k. \quad (3.7)$$

где  $B = \text{const}$ .

При расчете дроссельной характеристики по уравнению (3.7) используется всего одна переменная, причем тяга в пустоте  $P_n$  изменяется прямо пропорционально давлению в камере сгорания. На графике  $P_n = f(p_k)$  — это прямая линия, проходящая через начало координат и имеющая тангенс угла наклона к оси абсцисс, равный величине  $B$  в уравнении (3.7).

Разделив обе части уравнения (3.7) на величину секундного расхода топлива  $\dot{m}$  и используя уравнение (3.6), получим

$$I_{y n} = \frac{P_n}{\dot{m}} = \frac{B p_k}{A p_k} = C, \quad (3.8)$$

т. е. при принятых допущениях удельный импульс в пустоте  $I_{y n}$  постоянен и не зависит от давления в камере сгорания.

Вид дроссельной характеристики при наличии внешнего давления ( $p_n \neq 0$ ) зависит от того, влияет ли противодавление на рабочий процесс в сопле или не влияет. Если отношение  $p_a/p_n$  становится меньше некоторого критического значения, то нормальная работа сопла нарушается. При этом происходит отрыв потока от стенок сопла и в сопло входит скачок уплотнения. Значение  $(p_a/p_n)_{отр}$  находится в диапазоне 0,6 ... 0,25 и зависит от типа пограничного слоя (ламинарного или турбулентного) и числа  $M$  потока на срезе сопла.

Для случая безотрывного течения продуктов сгорания по соплу тяга и удельный импульс тяги при  $p_n \neq 0$  определяются из уравнений:

$$P = (\dot{m} \omega_a + p_a F_a) - p_n F_a = P_n - p_n F_a;$$

$$I_y = I_{y n} - \frac{p_n F_a}{m}$$

Подставляя в эти уравнения  $P_n$  из (3.7) и  $I_{y n}$  из (3.8), получаем:

$$P = V p_k - p_n F_a; \quad (3.9)$$

$$I_y = C - \frac{p_n F_a}{\dot{m}} = C - \frac{p_n}{p_k} \frac{F_a}{F_M} \beta. \quad (3.10)$$

Из уравнения (3.9) видно, что при данном внешнем давлении  $p_n$  или соответствующей ему высоте полета  $H$  тяга зависит только от давления в камере сгорания, и зависимость  $P = f(p_k)$  графически представляет прямую, смещенную вниз от прямой  $P_n = f(p_k)$  на величину  $p_n F_a$  (рис. 3.4, а). Поэтому для расчета зависимости  $P_n = f(p_k)$ , которую практически невозможно получить экспериментально, достаточно в земных условиях ( $H = 0$ ) определить зависимость  $P = f(p_k)$  и к найденным значениям тяги прибавить величину  $p_n F_a$  (верхняя и нижняя кривые рис. 3.4).

При изменении внешнего давления от атмосферного ( $H = 0$ ) до нуля ( $H = \infty$ ) для двигателя с фиксированным соплом можно получить множество параллельных прямых. Угол наклона этих прямых тем больше, чем больше площадь среза сопла  $F_a$ . Очевидно, зависимости  $P = f(p_k)$  при  $p_n = \text{const}$ , построенные для двух значений  $F_a$ , пересекаются при некотором  $p_k$ . При этом тяга двигателя с большим  $F_a$  оказывается меньше тяги двигателя с меньшим  $F_a$  при давлении в камере сгорания, меньших  $p_k$  в точке пересечения (аналогичная картина наблюдается и у зависимостей  $I_y = f(p_k)$  при различных  $F_a$ ).

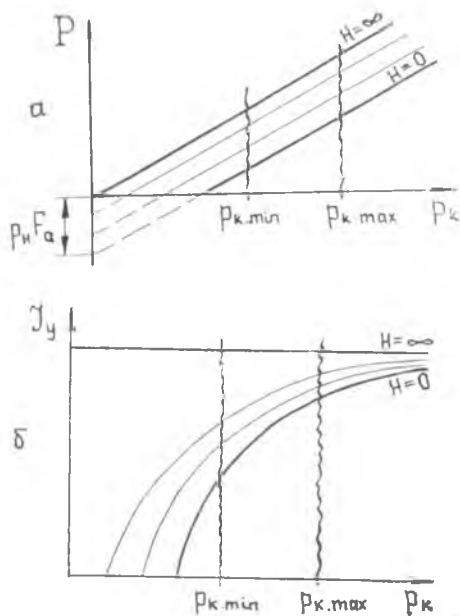


Рис. 3.4. Дроссельная характеристика ЖРД:  
 а — изменение тяги; б — изменение удельного импульса

Удельный импульс тяги  $I_y = f(p_k)$  при данном  $p_n \neq 0$  изменяется нелинейно (рис. 3.4 б) и, как это видно из формулы (3.10), выражается уравнением гиперболы с асимптотами  $p_k \rightarrow \infty, I_y = I_{yн}$  и  $p_k = 0; I_y \rightarrow -\infty$ . Таким образом во всех случаях, за исключением  $p_n = 0$ , уменьшение  $p_k$  при регулировании тяги двигателя приводит к падению значений удельного импульса тяги. Объясняется это относительным ростом отрицательной составляющей тяги, определяемой внешним давлением ( $p_n F_a$ ).

Отрыв потока в сопле, который может произойти на некотором режиме работы двигателя при снижении величины  $p_k$ , по сравнению с безотрывным режимом, ведет к росту удельного импульса тяги и соответственно тяги. Это связано с тем, что давление, действующее на внутреннюю стенку сопла в зоне отрывного течения, возрастает практически до внешнего давления  $p_n$ . Следовательно, площадь сопла, создающая отрицательную тягу на режиме перерасширения, уменьшается. Необходимо отметить, что и при наличии отрыва потока в сопле

общая тенденция падения значений  $P$  и  $I_y$  при уменьшении  $p_k$  сохраняется (рис. 3.5).

*Высотная характеристика* представляет зависимости тяги и удельного импульса от давления окружающей среды при постоянных давлении в камере сгорания и соотношении компонентов топлива (при постоянном режиме работы двигателя).

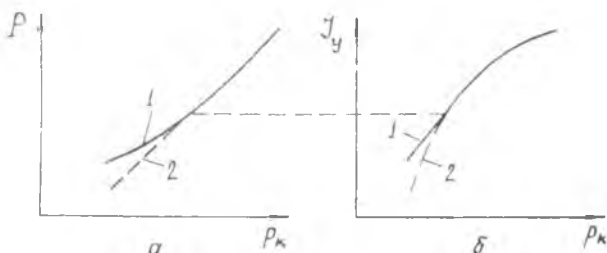


Рис. 3.5. Дроссельная характеристика с отрывом потока:  
 а — изменение тяги; б — изменение удельного импульса;  
 1 — с отрывом потока; 2 — безотрывное течение

Важность высотной характеристики обусловлена тем, что двигатель в полете во многих случаях работает при переменном давлении окружающей среды. При безотрывном течении газов в сопле высотная характеристика рассчитывается по уравнениям (3.9) и (3.10), причем единственной переменной при этом является давление окружающей среды  $p_n$ . Из уравнений (3.9) и (3.10) видно, что с увеличением давления окружающей среды  $p_n$  тяга  $P$  и удельный импульс тяги  $I_y$  уменьшаются, причем линейно (рис. 3.6, а, б соответственно).

Каждому значению  $p_k$  соответствует своя высотная характеристика (см. рис. 3.6). При этом, чем больше давление в камере сгорания, тем меньше относительно пустотного значения снижается удельный импульс тяги с ростом  $p_n$ . Увеличение площади среза сопла  $F_a$  при  $p_k = \text{const}$  ведет к росту значений  $P_n$  и  $I_{y_n}$  и увеличению угла наклона прямых  $P = f(p_n)$  и  $I_y = f(p_n)$  к оси абсцисс. Соответствующие кривые для двух значений  $F_a$  пересекаются при некотором значении  $p_n$ . При этом большему  $F_a$  соответствуют большие значения  $P$  и  $I_y$  при значениях давления окружающей среды, меньших  $p_n$  в точке пересечения. Отсюда следует, что двигатель с круглым соплом Лаваля в полете при переменном давлении окружающей среды будет более эффективен в случае регулирования пло-

щадн среза сопла  $F_a$  по определенному закону. Например, при увеличении высоты полета необходимо непрерывно увеличивать  $F_a$ , причем лучше это делать таким образом, чтобы на каждой высоте сопло работало на расчетном режиме.

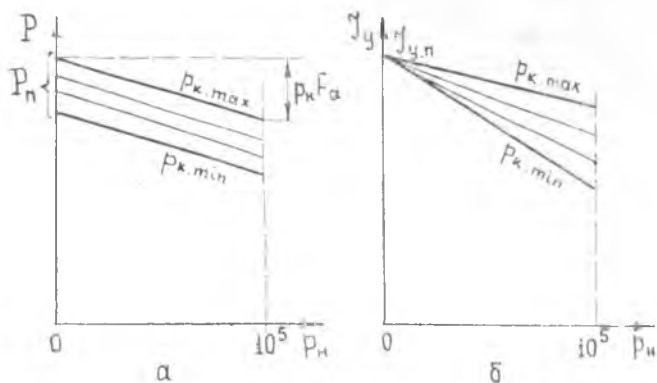


Рис. 3.6. Высотная характеристика ЖРД: а — изменение тяги; б — изменение удельного импульса

При росте давления окружающей среды для данного  $p_k = \text{const}$  уменьшается отношение  $pa/p_n$  и при условиях, отмеченных ранее, может произойти отрыв потока в сопле. В этом случае изменение протекания высотной характеристики при росте  $p_n$  аналогично изменению протекания дроссельной характеристики при уменьшении  $p_k$ . Расчетное определение как высотной, так и дроссельной характеристик при отрыве потока в сопле может быть осуществлено только весьма приближенно.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК

Дроссельная характеристика может быть получена экспериментально как на высотном, так и на земном стендах. Испытания на земном стенде гораздо проще и требуют существенно меньших затрат времени, в то же время качественно получаемые результаты идентичны. Однако вследствие относительно низких давлений в камерах сгорания ЖРДМТ ( $p_k = 5 \dots 15 \cdot 10^5$  Па) необходимо, чтобы сопло испытываемого двигателя имело малую геометрическую степень расширения  $F_a$ , что обеспечивает безотрывное течение продуктов сгорания.

Для снятия дроссельной характеристики выполняется 4...6 огневых пусков двигателя при различных расходах топлива в заданном диапазоне изменения тяги. Удобнее проводить пуски при одинаковых в обеих магистралях давлениях компонентов на входе в двигатель ( $p_{вх\text{ок}} = p_{вх\text{г}}$ ). При этом требуемое соотношение компонентов обеспечивается предварительной настройкой двигателя.

В процессе испытаний с помощью методов, описанных в разделе 1.2, измеряются: тяга, объемные расходы и температура компонентов, избыточное давление в камере сгорания, давление окружающей среды, продолжительность включения двигателя. По полученным данным для каждого режима работы двигателя определяются секундные массовые расходы компонентов и топлива, коэффициент избытка окислителя, удельный импульс тяги, давление в камере сгорания и, в случае необходимости, — расходный и тяговый комплексы. Результаты прямых измерений тяги и эти данные достаточны для построения дроссельной характеристики конкретного ЖРДМТ. При этом на основании проведенных испытаний дроссельная характеристика может быть найдена для всего возможного диапазона высот полета от  $H = 0$  до  $H = \infty$  (соответственно от давления окружающей среды, равного атмосферному, до давления, равного нулю).

Для определения высотной характеристики исследуемого двигателя не требуется дополнительных экспериментов.

Экспериментальное определение характеристик ЖРДМТ с соплом, имеющим обычную для таких двигателей степень расширения ( $\bar{F}_a = 30 \dots 50$ ), необходимо выполнять на высотном стенде. Методика проведения таких испытаний аналогична описанной выше.

#### *СРАВНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИК*

Рассмотрим, насколько теоретическая дроссельная характеристика ЖРДМТ, которая рассчитывается при ряде принятых допущений, соответствует экспериментальной.

Расчет теоретической дроссельной характеристики конкретного двигателя производится с учетом параметров его работы в какой-либо точке экспериментальной характеристики. Принимаем за исходные для расчета параметры двигателя (тягу, удельный импульс, расходный комплекс, давление в камере сгорания), полученные при максимальном расходе.

Тогда по уравнениям (3.9) и (3.10) можно вычислить значения постоянных В и С. Затем, используя те же уравнения и изменяя значения давления  $p_k$ , определяется теоретическая дроссельная характеристика двигателя. Типичные теоретическая и экспериментальная дроссельные характеристики ЖРДМТ для  $H = 0$  и  $H = \infty$  приведены на рис. 3.7. Из рисунка видно, что экспериментальные значения удельного импульса существенно меньше расчетных, особенно в области низких значений давления  $p_k$ . При изменении секундного расхода топлива  $\dot{m}$  в 2...3 раза эти различия могут составлять 10...30%, что объясняется падением значений коэффициента  $\varphi_k$  при уменьшении давления в камере сгорания, тогда как коэффициент сопла  $\varphi_c$  остается практически постоянным. Снижение эффективности процессов преобразования топлива в камере сгорания связано прежде всего с уменьшением перепада давления на форсунках двигателя  $\Delta p_{\phi}$  и соответственно скорости впрыска топлива. Это приводит к ухудшению процессов распыливания и перемешивания топлива. Кроме того, низкое давление, характерное для камер сгорания ЖРДМТ, отрицательно сказывается на скорости процессов, определяющих собственно горение топлива.

Однако, несмотря на различия в удельном импульсе тяги, расчетные и эмпирические зависимости тяги от давления  $p_k$  совпадают (рис. 3.7, а). Легко доказать, что так и должно быть:

$$P_{\text{н}} = \dot{m} I_{y_{\text{н}}} = \dot{m} \beta K_{P_{\text{н}}} = \dot{m} \frac{p_k F_M}{\dot{m}} K_{P_{\text{н}}} = p_k F_M K_{P_{\text{н}}}.$$

Учитывая, что при дроселировании  $K_{P_{\text{н}}} \cong \text{const}$ , получаем, что тяга прямо пропорциональна давлению в камере сгорания

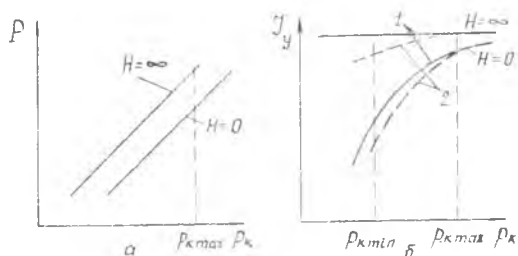


Рис. 3.7. Сравнение экспериментальной и теоретической дроссельных характеристик: а — изменение тяги; б — изменение удельного импульса; 1 — теоретическая характеристика; 2 — экспериментальная характеристика

независимо от изменений коэффициента  $\varphi_k = f(p_k)$ . Это обусловлено тем, что ухудшение процессов в камере сгорания одинаково сказывается и на тяге, и на давлении  $p_k$ . Если же построить зависимости тяги от расхода топлива или давления компонентов на входе в двигатель ( $p_{вх\text{ок}} = p_{вх\text{г}}$ ), как это часто делается для ЖРДМТ, то расхождение между экспериментальными и расчетными данными будет таким же, как и для удельного импульса тяги.

В отличие от дроссельной характеристики, теоретическая и экспериментальная высотные характеристики совпадают, т. е. для определения высотной характеристики двигателя (при безотрывном течении газа в сопле,  $m = \text{const}$  и  $a = \text{const}$ ) достаточно иметь эмпирические данные только при одной высоте полета (при одном значении давления окружающей среды).

### 3.3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖРДМТ В РЕЖИМАХ ОДИНОЧНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Кратковременная, импульсного типа работа характерна не только для широко применяемых в активных системах управления пространственным положением космических летательных аппаратов ЖРДМТ, но и для ЖРД средних уровней тяг (таких, например, как корректирующие и тормозные двигатели). В таких режимах рабочий процесс двигателя носит ярко выраженный нестационарный характер. Использование для описания подобных неустановившихся режимов абсолютных параметров, таких как тяга, мгновенный расход топлива, давление в камере сгорания, теряет практический смысл. Появляется необходимость введения интегральных характеристик для оценки величины импульса, создаваемого за одно включение двигателя, и экономичности при импульсной работе. Кроме того, важно знание характерных промежутков времени, в течение которых эти скоротечные процессы в двигателе совершаются.

Типичная осциллограмма импульсной работы ЖРДМТ в режиме одиночных включений в вакууме (при  $p_n = 7 \text{ Па}$ ) приведена на рис. 3.8. На ней записана картина изменения во времени  $\tau$  силы тока  $i$ , напряжения  $u$  на электромагнитах клапанов двигателя, давлений в топливных магистралях перед входом в двигатель  $p_{вх\text{г}}$ ,  $p_{вх\text{ок}}$  и давления в камере сгорания



$p_k$ , а также показаны характерные точки импульса (их смысл далее поясняется).

Под режимом одиночных включений ЖРДМТ понимается режим работы с паузами, в течение которых двигатель приходит в исходное состояние, т. е. в нем опорожняются заклапанные полости, устанавливается исходное тепловое состояние двигателя и т. д.

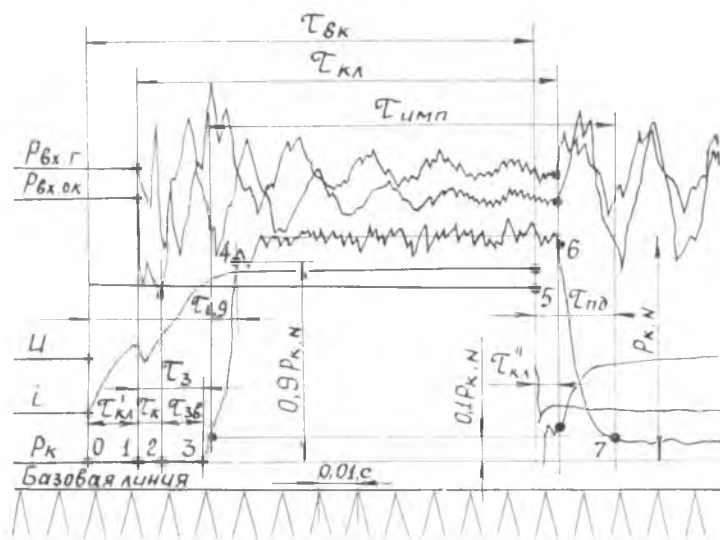


Рис. 3.8. Осциллограмма импульса ЖРДМТ

Энергетическая характеристика импульса ЖРДМТ при однократном включении определяется как интеграл тяги за время этого включения.

Отмеченные особенности обуславливают необходимость оценки не только характеристик экономичности, но и динамических свойств двигателя при работе в нестационарных режимах.

### ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Под динамическими характеристиками ЖРДМТ понимаются зависимости показателей быстродействия двигателя при запуске и останове от различных параметров, определяющих как режим работы, так и условия эксплуатации.

Быстродействие двигателя оценивается временем достижения контрольного уровня тяги, отсчитанным от определенного фиксированного в импульсе момента.

За такой момент при запуске двигателя обычно принимается начало электрической команды, подаваемой на топливные электроклапаны, при доводке конструкции и рабочего процесса в камере сгорания — начало поступления компонентов через клапаны (соответственно это точки 0 и 1 на рис. 3.8). Поскольку в двигателе существуют заклапанные полости между клапанами и выходом из форсунок в камеру сгорания, то после открытия клапанов они в течение времени  $\tau_k$  заполняются топливом, но до момента появления топлива в камере (точка 2) импульс не создается. Пренебрежимо мала величина создаваемого импульса и в некоторый следующий интервал времени  $\tau_{зв}$ , отсчитанный от момента начала поступления компонентов в камеру сгорания до момента воспламенения топлива (от точки 2 до точки 3), что объясняется задержкой воспламенения компонентов в камере сгорания в условиях практически нулевого начального значения давления из-за существенного снижения их химической активности. В качестве контрольной отметки, характеризующей выход на режим, обычно принимается значение тяги или давления  $p_k$ , составляющее 90% значения тяги или давления в камере на непрерывном режиме  $p_{кн}$  (точка 4). Соответственно и время выхода ЖРДМТ на режим обозначается  $\tau_{0,9}$  (см. рис. 3.8).

При останове двигателя за начало отсчета могут приниматься либо моменты снятия напряжения с электроклапанов, либо начало падения давления в камере сгорания (соответственно точки 5 и 6 на рис. 3.8). Временем останова ЖРДМТ считается интервал времени от момента снятия напряжения с электроклапана до момента, когда тяга или давление в камере снизятся до значения, равного 10% значения тяги или давления в камере на непрерывном режиме (точка 7), чему соответствует время  $\tau_{пл}$  на осциллограмме.

Из режимных факторов на динамические свойства наибольшее влияние оказывают величины давлений на входе в двигатель, частота включений двигателя и напряжение на электромагнитах клапанов, из эксплуатационных — температура топлива и конструкции двигателя.

В целом быстродействие двигателя зависит от динамики привода клапанов и конструктивного совершенства камеры двигателя.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКОНОМИЧНОСТИ

Экономичность работы ЖРДМТ при режиме одиночных включений характеризуется удельным импульсом  $I_{yод}$ , представляющим отношение развиваемой за одно включение двигателя величины импульса тяги  $I_{п}$  к массовому расходу топлива  $m$  за это включение:

$$I_{yод} = \frac{I_{п}}{m} = \frac{\int P d\tau}{\int \dot{m} d\tau}.$$

Поскольку ЖРДМТ эксплуатируются в основном в вакууме, то при оценке экономичности таких двигателей принимается пустотное значение  $I_{yот}$ .

Для оценки экономичности камеры сгорания в режиме одиночных включений используется расходный комплекс  $\beta_{од}$ , который вычисляется как отношение импульса, создаваемого камерой сгорания за одно включение, к массовому расходу топлива за это включение:

$$\beta_{од} = \frac{F_{м} \int p_{к} d\tau}{\int \dot{m} d\tau}.$$

Как видно из рис. 3.8, топливо в двигателе в течение времени  $\tau_з = \tau_k + \tau_{зв}$  расходуется при каждом включении непроизводительно. В основном по этой причине, а также из-за сильной нестационарности процесса сгорания топлива после воспламенения (точка 3) экономичность импульсной работы ЖРДМТ оказывается существенно ниже непрерывной. При этом  $I_{yод}$  тем меньше по сравнению с  $I_{yп}$  (в непрерывном режиме), чем меньше время открытого состояния электроклапанов  $\tau_{кл}$ .

Экономичность работы ЖРДМТ зависит также от ряда других режимных параметров, таких как коэффициент избытка окислителя  $\alpha$ , давление подачи компонентов в двигатель  $p_{пк}$  (при изменении этого давления изменяются перепад давлений на форсунках и условия распыла жидких компонентов), частота  $f$  включения двигателя (при уменьшении паузы между смежными импульсами происходит накапливание тепла конструкцией, а возможно, и рабочего тела в камере сгорания, что уменьшает величину  $\tau_з$  от импульса к импульсу). Из эксплуатационных факторов на величину удельного импульса наибо-

лее заметное влияние оказывают температура топлива и тепловое состояние конструкции двигателя.

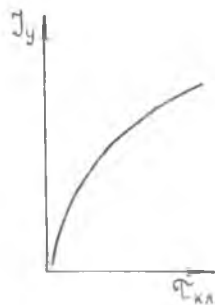


Рис. 3.9. Характеристика экономичности ЖРДМТ от продолжительности подачи топлива в камеру сгорания

Характеристики экономичности ЖРДМТ представляют зависимости удельного импульса от одного из параметров:  $\alpha$ ,  $p_{вх}$ ,  $\tau_{кл}$ ,  $f$  и др. Типичный вид зависимости удельного импульса от  $\tau_{кл}$ , характерной для работы ЖРДМТ в режиме одиночных включений, представлен на рис. 3.9.

В практике исследования и доводки ЖРДМТ из-за сложности аналитического описания нестационарных процессов и учета большого количества разнообразных факторов пока преобладают экспериментальные методы получения характеристик. Испытания двигателя проводятся на расходном вакуумном стенде (см. рис. 1.13), оснащенном системами измерения быстроменяющихся параметров рабочего процесса двигателя. Перед запуском обеспечивается давление в вакуумной камере и полости камеры ЖРДМТ порядка  $p_{н} = 1,4$  Па. Регистрация параметров осуществляется на фотобумагу (см. рис. 3.8).

#### ОЦЕНКА СТЕПЕНИ СОВЕРШЕНСТВА ЖРДМТ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ РАБОТЕ

Исследования ЖРДМТ проводятся с целью определения как динамических свойств электроклапанов, так и показателей динамического совершенства камеры сгорания, а также для выявления практических возможностей улучшения эффективности преобразования топлива в импульсных режимах вообще и в менее экономичных режимах одиночных включений, в частности.

Интервалы времени, характеризующие динамические свойства двигателя, определяются либо вручную с осциллограмм импульсов (см. рис. 3.8), либо автоматически с помощью системы сбора и обработки экспериментальных данных (см. раздел 2.2.).

Значения времени  $\tau'_{кл}$  и  $\tau''_{кл}$  характеризуют быстрдействие топливных электроклапанов соответственно при открытии и закрытии. Их величины, полученные в эксперименте, используются для уточнения таких конструктивных параметров

электроклапанов, как сила действия пружины, прижимающей клапан к седлу, площадь контакта клапанной пары, мощность электромагнита и т. д. Изменения в конструкцию электроклапанов вносятся до тех пор, пока не будут выполнены заданные требования по быстродействию клапанов.

В зависимости от полученного значения  $\tau_k$  принимаются конструктивные меры по уменьшению объемов заклапанных полостей форсуночной головки ЖРДМТ.

Форма импульса определяется значениями  $\tau_{0,9}$  и  $\tau_{0,1}$ , по мере уменьшения которых импульс приближается к прямоугольному, наилучшему с точки зрения эффективности функционирования ЖРДМТ в системе управления пространственным положением космического аппарата. Уменьшение  $\tau_{0,9}$  и  $\tau_{0,1}$  представляет сложную задачу, которая решается в основном с помощью конструктивных мероприятий: уменьшение заклапанных полостей, подбор соотношения между объемом камеры сгорания и площадью минимального сечения сопла, выбор типа, параметров форсунок и т. д.

Задержка воспламенения  $\tau_{зв}$  ухудшает не только динамические показатели камеры сгорания и двигателя, но и снижает его экономичность. Поэтому уменьшение  $\tau_{зв}$  является одной из главных задач экспериментальной доводки ЖРДМТ. Для двухкомпонентных ЖРДМТ на самовоспламеняющемся топливе величина  $\tau_{зв}$  определяется в основном системой смешивания в камере сгорания.

Время включения ЖРДМТ  $\tau_{вк}$  и открытого состояния электроклапанов  $\tau_{кл}$  определяет величину создаваемого импульса, массовый расход топлива за одно включение и, следовательно, экономичность двигателя  $I_{уод}$ . Зависимость  $I_{уод}$  от  $\tau_{кл}$  или от  $\tau_{вк}$  представляет регулировочную характеристику ЖРДМТ, причем время  $\tau_{вк}$  используется для аттестации двигателя, прошедшего доводку и принятого к эксплуатации в системе управления положением аппарата в пространстве. Время же  $\tau_{кл}$  удобнее использовать в качестве параметра на этапе экспериментального совершенствования двигателя в процессе доводки.

Для оценки степени снижения эффективности двигателя при переходе от непрерывного  $I_{ун}$  к импульсным режимам одиночных включений  $I_{уод}$  применяется относительный показатель экономичности  $\bar{I}_{уод} = I_{уод} / I_{ун}$ , значения которого существенно меньше единицы. Анализ показывает, что основной причиной низких значений  $I_{уод}$  и  $\bar{I}_{уод}$  является наличие в двигателе заклапанных полостей (участок 1—2 на рис. 3.8) и задержка

воспламенения компонентов (участок 2—3) импульса. Параметры ЖРДМТ при работе в импульсных режимах определяются по методике, изложенной в разделе 2.1.

Количественная оценка суммарного влияния  $\tau_k$  и  $\tau_{зв}$  на экономичность камеры сгорания ЖРДМТ может быть выполнена в предположении постоянства давлений подачи обоих компонентов в продолжение импульса. Тогда, используя уравнение секундного расхода жидкости через форсунки  $\dot{m}_\phi = \mu F_\phi \sqrt{2 \rho \Delta p_\phi}$  (где  $\Delta p_\phi$  — перепад давлений на форсунках), для непрерывного режима работы двигателя можно записать:

$$\dot{m}_\phi = \mu F_\phi \sqrt{2 \rho (p_{вх} - p_{кN})}, \quad (3.11)$$

где  $p_{вх}$  и  $p_{кN}$  — абсолютные значения давлений, величины  $p_{вх}$  перед топливными клапанами двигателя и  $p_{кN}$  в камере сгорания при номинальном расходе определяются либо по манометрам, либо по первичным преобразователям электрического типа, например, ДД-10. Для участка 1—3 импульса (см. рис. 3.8), на котором  $p_k$  близко к нулю, имеем

$$\dot{m}_3 = \mu F_\phi \sqrt{2 \rho p_{вх}}. \quad (3.12)$$

Полагая коэффициент расхода  $\mu$  через форсунки одинаковым на участках 1—3 и 4—6 импульса (см. рис. 3.8) и разделив уравнение (3.12) на (3.11), можно определить значение секундного расхода топлива на участке задержки появления тяги  $\tau_3$ :

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_3 \sqrt{\frac{p_{вх}}{p_{вх} - p_{кN}}}.$$

Отсюда видно, что расход топлива в единицу времени на участке запуска существенно больше, чем при непрерывной работе двигателя. Вычитая из суммарного расхода топлива  $\Delta m_{II}$ , измеренного за импульс, величину расхода на участке  $\tau_3$ , практически не пошедшего на создание импульса,  $\Delta m_3 = \dot{m}_3 \tau_3$ , получим показатель  $\bar{m}_{II}$ , достаточно близкий к значению  $\bar{I}_{y.од}$ :

$$\bar{m}_{II} = 1 - \frac{\Delta m_3}{\Delta m_{II}}.$$

Разница между  $\bar{m}_{II}$  и  $\bar{I}_{y.од}$  (рис. 3.10) количественно характеризует дополнительные, не учтенные при данном упрощенном анализе виды потерь топлива при импульсной работе.

Эти потери обусловлены нестационарностью рабочего процесса после запуска двигателя, интенсивным теплоотводом от продуктов сгорания в стенку камеры и окружающую среду во время импульса, влиянием колебаний давления подачи топлива и другими факторами. Выявление и учет этих потерь проводится при детальном исследовании рабочего процесса в ЖРДМТ.

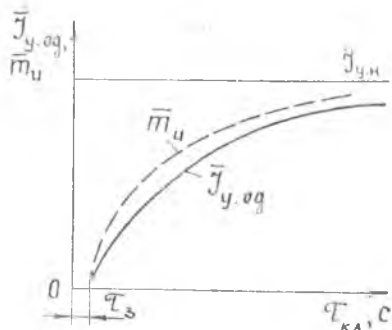


Рис. 3.10. Показатели эффективности импульсной работы ЖРДМТ

При определении значений удельного импульса в режиме одиночных включений обычно не учитывается и часть импульса правее точки 7 на рис. 3.8, получаемого от выгорания и испарения топлива из заклананных полостей после останова двигателя. Изучение импульса последействия двигателя является самостоятельной задачей, решение которой направлено на минимизацию величины импульса последействия. Такой анализ зависимости экономичности от времени включения может выполняться на этапе проектирования ЖРДМТ с использованием статистических экспериментальных данных по прототипам схем смесеобразования с целью выбора исходных режимных и конструктивных параметров двигателя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Тишин А. П. Теория ракетных двигателей. — М.: Машиностроение, 1980. — 533 с.
2. Беляев Н. М., Уваров Е. И. Расчет и проектирование реактивных систем управления космических летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1974. — 199 с.
3. Жуковский А. Е., Кондрусов В. С., Левин В. Я., Окорочков В. В. Испытания жидкостных ракетных двигателей. — М.: Машиностроение, 1981. — 199 с.
4. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Справочник в 10 т. Под ред. акад. В. П. Глушко. — М.: ВИНТИ АН СССР, 1971—1979.
5. РТМ 44—62. Методика статистической обработки эмпирических данных. — М.: Стандартгиз, 1966.

## ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

---

### Сокращения:

ДЛА — двигатель летательного  
аппарата

ЖРДМТ — жидкостный ракетный  
двигатель малой тяги

### Сечения ракетной камеры:

к — вход в камеру сгорания

м — минимальное

с — выход из камеры сгорания

а — выход из сопла

### Индексы:

г — горючее

р — равновесный, расчетный

з — на Земле

с — сопло

к — камера сгорания

т — теоретический

ок — окислитель

у — удельный

п — в пустоте

э — экспериментальный

### Условные обозначения:

$\alpha$  — коэффициент избытка окислителя

$n$  — средний показатель изэнтропии

$\beta$  — расходный комплекс

$P$  — тяга

$F$  — площадь поперечного сечения

$p$  — давление

$R$  — удельная газовая постоянная

$I_y$  — удельный импульс тяги

$\rho$  — плотность

$T$  — абсолютная температура

$K_m$  — массовое соотношение компонентов топлива

$\tau$  — время

$\varphi$  — коэффициент полноты удельного параметра

$m$  — массовый секундный расход топлива

$w$  — скорость рабочего тела



# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

Предисловие . . . . .	5
1. ИССЛЕДОВАНИЯ ЖРДМТ. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА . . . . .	7
1.1. Особенности ЖРДМТ . . . . .	7
1.2. Измерение основных параметров . . . . .	11
1.3. Экспериментальное оборудование . . . . .	23
2. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИИ ЖРДМТ . . . . .	33
2.1. Методика обработки измеренных параметров . . . . .	33
2.2. Автоматизированная система сбора и обработки информации . . . . .	37
2.3. Статистические методы анализа результатов . . . . .	43
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЖРДМТ . . . . .	66
3.1. Характеристика по составу топлива . . . . .	66
3.2. Статические эксплуатационные характеристики . . . . .	74
3.3. Характеристики ЖРДМТ в режимах одиночных включений . . . . .	82
Литература . . . . .	89
Основные сокращения и условные обозначения . . . . .	90

*Виктор Григорьевич Заботин*  
*Виктор Семенович Кондрусев*  
*Валентин Евгеньевич Нигодюк*

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖРД

Учебное пособие

Редактор Э. Грязнова  
Техн. редактор П. Каленюк  
Корректор Н. Куприанова

Сдано в набор 9.11.81 г. Подписано в печать 11.12.81 г. ЕО17512.  
Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага писчая белая.  
Литературная гарнитура. Высокая печать. Усл. п. л. 5,4.  
Уч.-изд. л. 5,0. Тираж 1000 экз. Заказ № 933. Цена 15 к.

---

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный институт им. С. П. Королева, г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151  
Типография УЭЗ КуАИ, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.