

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

*В.С. Егорычев, А.В. Сулинов*

## ЖИДКОСТНЫЕ РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ МАЛОЙ ТЯГИ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по программам высшего профессионального образования по укрупненной группе направлений 160000 Авиационная и ракетно-космическая техника

САМАРА  
Издательство СГАУ  
2014

УДК 629.7.036(075.8)

ББК 39.65

Е 307

Рецензенты: главный конструктор ПФ ОАО «НПО ЭНЕРГОМАШ  
им. академика В. П. ГЛУШКО» И. А. Г а н и н,  
канд. техн. наук, доц. В. А. Б о р и с о в

***Егорычев В.С.***

Е 307

**Жидкостные ракетные двигатели малой тяги и их характеристики:** учеб. пособие / *В.С. Егорычев, А.В. Сулинов.* – Самара: Изд-во СГАУ, 2014. – 128 с.: ил.

**ISBN 978-5-7883-0961-3**

Приведены общие сведения о ЖРДМТ и дана их классификация. Рассмотрены отличительные особенности конструкции, организации рабочего процесса, режимов работы и характеристик.

Систематизирован опыт экспериментального определения характеристик ЖРДМТ в непрерывных и импульсных режимах. Рассмотрены стенды для их испытаний, методы и средства проведения испытаний, измерения параметров рабочего процесса, ручной и автоматизированной обработки результатов испытаний.

Предназначено для специалистов направления подготовки 160700.65 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» - специализация «Инновационные технологии в ракетном двигателестроении», для магистрантов по направлению 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов» - специализация «Энергетика, экология и двигательные установки ракетных и космических систем».

Учебное пособие необходимо для подготовки специалистов при изучении учебных дисциплин «Теория и расчет жидкостных ракетных двигателей», «Исследование рабочего процесса в ракетных двигателях», «Испытания ракетных двигателей», при выполнении лабораторных и курсовых работ и дипломного проектирования.

Выполнено на кафедре теории двигателей летательных аппаратов.

УДК 629.7.036(075.8)

ББК 39.65

**ISBN 978-5-7883-0961-3**

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2014

## О Г Л А В Л Е Н И Е

Основные сокращения, условные обозначения и индексы .....	5
ПРЕДИСЛОВИЕ.....	8
ВВЕДЕНИЕ.....	10
1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ МАЛОЙ ТЯГИ.....	12
1.1 ЖРДМТ и их классификация .....	12
1.2 Отличительные особенности ЖРДМТ .....	14
1.3 Режимы работы ЖРДМТ и их классификация .....	17
1.4 Устройство и принцип работы однокомпонентного ЖРДМТ .....	19
1.5 Устройство и принцип работы двухкомпонентного ЖРДМТ .....	22
2 ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖРДМТ .....	30
2.1 Статические характеристики .....	30
2.1.1 Характеристика по составу топлива.....	31
2.1.2 Дроссельная характеристика.....	38
2.1.3. Высотная характеристика.....	42
2.2 Динамические характеристики .....	45
2.2.1 Параметры ЖРДМТ в импульсном режиме .....	45
2.2.2 Характеристика по длительности включения ЖРДМТ .....	52
2.2.3 Характеристика по частоте включения ЖРДМТ .....	57
2.2.4 Характеристика по порядковому номеру следования включения двигателя в серии .....	59
3 ИСПЫТАНИЯ ЖРДМТ .....	61
3.1 Виды испытаний и их классификация .....	61
3.2 Стенды для испытаний ЖРДМТ .....	65
3.2.1. Стенд для холодных испытаний ЖРДМТ.....	70
3.2.2 Стенды для огневых испытаний ЖРДМТ.....	72
3.2.3 Система измерений параметров ЖРДМТ.....	78
3.2.3.1 Измерение тяги ЖРДМТ.....	80
3.2.3.2 Измерение расходов компонентов топлива.....	84
3.2.3.3 Измерение давлений.....	88
3.2.4 Автоматизированная система управления и информационного обеспечения испытаний ЖРДМТ .....	90
3.3 Экспериментальное оборудование для исследований рабочего процесса ЖРДМТ.....	98

3.3.1 Стенд оптико-физических исследований рабочего процесса ЖРДМТ.....	99
3.3.2 Измерение температуры наружной поверхности камеры ЖРДМТ с помощью инфракрасной тепловизионной системы.....	102
3.3.3 Метод экспериментального определения профилей температуры высокотемпературного газового потока в камере ЖРДМТ.....	104
3.4 Методика обработки результатов испытаний .....	106
3.5 Экспериментальные статические и динамические характеристики ЖРДМТ и их анализ.....	115
3.5.1 Статическая характеристика ЖРДМТ по составу топлива .....	115
3.5.2 Статические дроссельная и высотная характеристики ЖРДМТ .....	118
3.5.3 Динамические характеристики ЖРДМТ в импульсном режиме работы.....	122
Библиографический список.....	125

## Основные сокращения, условные обозначения и индексы

### С о к р а щ е н и я

ДУ – двигательная установка;  
ЖРД – жидкостный ракетный двигатель;  
ЖРДМТ – жидкостный ракетный двигатель малой тяги;  
ЖРДУ – жидкостная ракетная двигательная установка;  
КА – космический аппарат;  
КС – камера сгорания;  
ЛА – летательный аппарат;  
ПС – продукты сгорания;  
РД – ракетный двигатель;  
РДМТ – ракетный двигатель малой тяги;  
РТ – рабочее тело.

### У с л о в н ы е о б о з н а ч е н и я

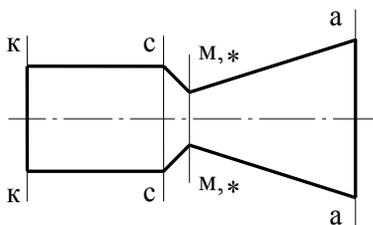
$D, d$  – диаметр;  
 $F$  – площадь;  
 $f$  – удельная площадь;  
 $\bar{F}$  – относительная площадь сечения камеры;  
 $I_y$  – удельный импульс тяги;  
 $K_m$  – массовое действительное соотношение компонентов;  
 $K_m^o$  – массовое стехиометрическое соотношение компонентов;  
 $L, l$  – длина;  
 $m$  – масса;  
 $\dot{m}$  – массовый расход;  
 $n$  – средний показатель изоэнтропы расширения;  
 $P$  – тяга;  
 $p$  – давление;  
 $R_o, R$  – универсальная и удельная газовые постоянные соответственно;  
 $r$  – радиус;  
 $T$  – температура;

$\varphi_{\beta}$  – коэффициент полноты расходного комплекса;  
 $\varphi_1$  – коэффициент удельного импульса;  
 $\varphi_k$  – коэффициент камеры сгорания;  
 $\varphi_c$  – коэффициент сопла;  
 $w$  – скорость рабочего тела;  
 $\alpha_{ок}$  – коэффициент избытка окислителя;  
 $\beta$  – расходный комплекс;  
 $\mathcal{E}$  – степень расширения рабочего тела в сопле;  
 $\lambda$  – приведенная скорость;  
 $\mu$  – коэффициент расхода, молярная масса;  
 $\rho$  – плотность;  
 $\sigma_f$  – коэффициент восстановления полного давления;  
 $\tau$  – время;  
 $\xi$  – коэффициент потерь удельного импульса тяги.

## И н д е к с ы

а – выход из сопла;  
вх – вход;  
вых – выход;  
г – горючее;  
з – завеса;  
ид – идеальный;  
к – камера или вход в камеру;  
н – атмосферный;  
ок – окислитель;  
о – параметр торможения;  
опт – оптимальный;  
п – в пустоте;  
пр – пристенок;  
р – расчетный;  
с – вход в сопло;  
ср – среднее значение;  
ст – стенка;  
я – ядро.

## Сечения камеры



- к – вход в камеру;
- с – вход в сопло;
- М – минимальное сечение сопла;
- \* – критическое сечение сопла;
- а – выход из сопла.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое учебное пособие является дополнением к учебной литературе по дисциплинам «Теория и расчет жидкостных ракетных двигателей», «Исследование рабочего процесса в ракетных двигателях» и «Испытания ракетных двигателей». Оно посвящено жидкостным ракетным двигателям малой тяги (ЖРДМТ), являющимся исполнительными органами активных систем управления космическими аппаратами.

Необходимость написания настоящего пособия продиктована тем, что в известной на сегодняшний день учебной литературе по жидкостным ракетным двигателям [1-8] либо не рассматриваются отличительные особенности теории рабочего процесса, проектирования, конструкции и испытаний ЖРДМТ, либо эти вопросы отражены недостаточно полно. Практически не освещена методика экспериментального получения статических и динамических характеристик и параметров экономичности, по которым оценивается степень совершенства разрабатываемого двигателя, его конкурентоспособность на мировом рынке. Настоящее пособие продолжает традиции ранее подготовленной в СГАУ учебной литературы по ЖРДМТ [9, 10] и учитывает достижения последних двух десятилетий в рассматриваемой области.

Руководствуясь стремлением реализовать в процессе подготовки будущих специалистов инновационные технологии, авторы обобщили в пособии опыт научно-исследовательской работы с ЖРДМТ, подготовки и проведения экспериментов в условиях, приближенных к

космическим, определения требуемых характеристик в непрерывном и импульсном режимах, обработки экспериментальных данных и анализа полученных результатов.

В пособии рассматриваются особенности рабочих процессов и устройства ЖРД малой тяги на однокомпонентном и самовоспламеняющемся двухкомпонентном топливе, методы и средства измерения и регистрации их параметров, экспериментальное оборудование для наземных и высотных испытаний ЖРДМТ. Эти сведения позволяют подготовить специалистов к практическому выполнению экспериментальных исследований рабочего процесса ЖРДМТ.

Изложена методика ручной и автоматизированной обработки информации, получаемой при исследованиях ЖРДМТ на непрерывных и импульсных режимах работы. Это дает возможность подготовить специалистов к самостоятельному выполнению первичной обработки результатов испытаний двигателя.

Приведены теоретические сведения о статических и динамических характеристиках ЖРДМТ, показаны особенности оценки характеристик импульсной работы ЖРД малой тяги в режиме одиночных включений, описываются методы экспериментального определения основных характеристик ЖРДМТ, анализируются экспериментальные характеристики двигателей.

Учебное пособие построено с учетом решения конкретных задач исследования. Каждый раздел логически и структурно завершен и ориентирован на практическое применение в качестве дополнительного материала, необходимого для выполнения лабораторных работ, самостоятельной работы, курсового и дипломного проектирования.

## ВВЕДЕНИЕ

Для успешного выполнения постоянно усложняющихся задач, стоящих перед космическими аппаратами (КА) различного назначения, необходимо эффективно управлять этими аппаратами в космическом пространстве. Системы управления КА выполняют следующие функции:

- ликвидируют возмущения, неизбежно возникающие при отделении КА от ракеты-носителя, т.е. осуществляют начальное успокоение аппарата;
- ориентируют КА в заданной системе координат;
- поддерживают ориентацию КА с требуемой точностью;
- стабилизируют положение КА в процессе выполнения аппаратом различных корректирующих, тормозных и разгрузочных функций;
- выполняют программные развороты КА, необходимые для решения поставленных задач;
- корректируют скорость и траекторию полета КА;
- осуществляют угловые и линейные перемещения КА во время маневра;
- выполняют причаливание и стыковку;
- тормозят КА при спусках;
- создают требуемые перегрузки на борту КА.

Исполнительными органами реактивных систем управления космическими аппаратами являются жидкостные ракетные двигатели малой тяги (ЖРДМТ). Так пилотируемый КА «Союз ТМ» оснащен 14 ЖРДМТ тягой 135 Н и 14 двигателями тягой 25 Н.

В настоящем учебном пособии приведены общие сведения о ЖРДМТ и дана их классификация, рассмотрены отличительные особенности конструкции, организации рабочего процесса, режимов работы и характеристик.

Пособие предназначено для специалистов направления подготовки 160700.65 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» - специализация «Инновационные технологии в ракетном двигателестроении», для магистрантов по направлению 160700.68

«Двигатели летательных аппаратов» - специализация «Энергетика, экология и двигательные установки ракетных и космических систем».

Учебное пособие необходимо для подготовки специалистов при изучении учебных дисциплин «Теория и расчет жидкостных ракетных двигателей», «Исследование рабочего процесса в ракетных двигателях», «Испытания ракетных двигателей», при выполнении курсовых и лабораторных работ и дипломных проектов.

# 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ МАЛОЙ ТЯГИ

## 1.1 ЖРДМТ и их классификация

Согласно ГОСТ 17655-89 «Двигатели ракетные жидкостные. Термины и определения» жидкостный ракетный двигатель малой тяги (ЖРДМТ) – это ЖРД тягой не более 1600 Н. ЖРДМТ способен работать как в непрерывном, так и в импульсном режиме и используется в качестве исполнительного органа системы управления космическим аппаратом.

На рисунке 1.1 приведена классификация жидкостных ракетных двигателей малой тяги.

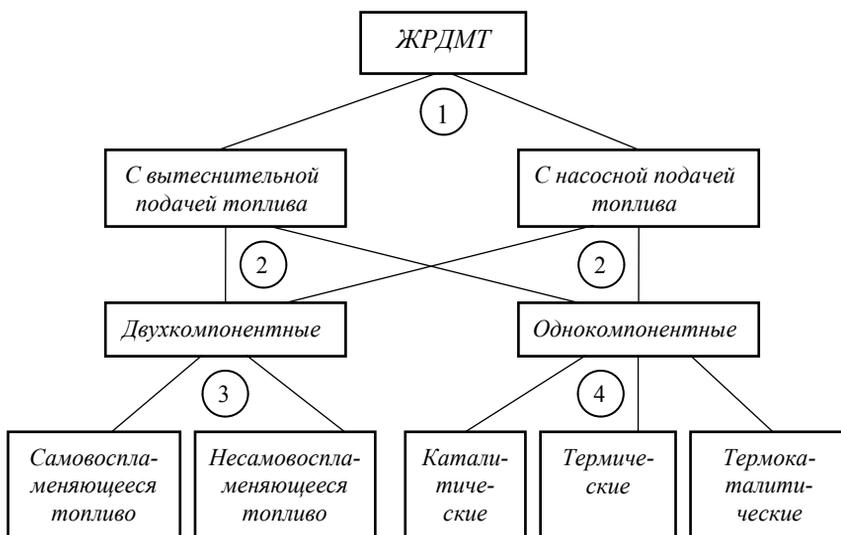


Рисунок 1.1 – Классификация ЖРДМТ

Она проведена по следующим признакам:

① – способу подачи топлива;

- ② – количеству компонентов топлива;
- ③ – способности компонентов топлива к самовоспламенению;
- ④ – способу разложения однокомпонентного топлива.

По способу подачи компонентов топлива ЖРДМТ могут быть с насосной и вытеснительной подачей топлива. Преимущество вытеснительных систем подачи топлива заключается в их относительной конструктивной простоте, однако их основным недостатком является значительная масса двигательной установки из-за большого давления в топливных баках, которое должно превышать давление в камере сгорания ЖРДМТ. Недостаток турбонасосных систем подачи состоит в значительной сложности турбонасосного агрегата (ТНА). Наиболее эффективной системой подачи топлива в ЖРДМТ считается та, которая при заданном суммарном импульсе двигательной установки  $KA I_{\Sigma}$  обеспечит меньшую массу двигательной установки (ДУ) в заправленном состоянии  $m_{ДУ}$ , т.е. максимальное значение отношения  $I_{\Sigma}/m_{ДУ}$  при отсутствии других ограничений (по затратам, срокам разработки и т.д.).

Проведенный сравнительный анализ энергомассовых параметров и характеристик ДУ с вытеснительной и насосной подачей топлива показал, что в условиях космического пространства и низкого давления в камере сгорания ЖРДМТ наиболее оптимальными на сегодняшний день оказываются ЖРДУ с вытеснительной системой подачи. В космическом пространстве при низком давлении окружающей среды можно даже при невысоком давлении в камере сгорания получить достаточно высокий удельный импульс тяги за счет значительной степени расширения рабочего тела в сопле.

По количеству компонентов топлива ЖРДМТ бывают однокомпонентные и двухкомпонентные [1, 2, 11, 12]. В однокомпонентных ЖРДМТ используется тепловая энергия, выделяющаяся при экзотермической реакции разложения однокомпонентного жидкого ракетного топлива. Продукты разложения, нагретые этим теплом до высокой температуры, являются рабочим телом камеры ЖРДМТ.

По способности компонентов двухкомпонентного топлива к самовоспламенению двухкомпонентные ЖРДМТ бывают на самовоспламеняющемся и несамовоспламеняющемся жидком топливе. Двухкомпонентные ЖРДМТ на самовоспламеняющемся топливе нашли в активных системах управления КА в настоящее время наибольшее распространение. Штатным топливом для них является азотный тетраоксид ( $N_2O_4$ ) и диметилгидразин несимметричный ( $H_2N-NH(CH_3)_3$ ).

По способу разложения топлива однокомпонентные ЖРДМТ бывают каталитические, термические и термокatalитические. В каталитических ЖРДМТ превращение топлива в газообразные продукты химической реакции разложения осуществляется с помощью катализатора. В термических ЖРДМТ превращение топлива в газообразные продукты химической реакции разложения происходит в результате внешнего источника энергии, в качестве которого, например, может использоваться электрическая энергия. В термокatalитических ЖРДМТ производится принудительный нагрев катализатора для повышения его химической активности. Это приводит к повышению экономичности и улучшению динамических характеристик двигателя.

В ДУ КА может входить несколько десятков ЖРДМТ. Например, объединенная двигательная установка служебного модуля станции «Мир» включала в себя 32 ЖРДМТ тягой 135 Н. Поэтому большое значение имеет снижение габаритных размеров и массы ЖРДМТ, а также всех агрегатов ЖРДУ КА.

## 1.2 Отличительные особенности ЖРДМТ

Важной отличительной особенностью ЖРДМТ является низкий уровень тяги на непрерывном режиме работы. Величина тяги двигателя определяется прежде всего его назначением и выполняемой функцией в системе управления КА. К настоящему времени созданы двигатели этого класса, развивающие тягу от нескольких десятых долей ньютона до 1600 Н.

Вторая отличительная особенность ЖРДМТ заключается в том, что они должны надежно работать как в непрерывном, так и в импульсных режимах. От двигателей активной системы управления

пространственным положением КА требуется срабатывание до нескольких сотен тысяч раз, причем в зависимости от задач управления длительность одного включения двигателя может изменяться от нескольких сотых до десятых долей секунды. Эти включения двигателя могут следовать с разной частотой (скважностью). Если же двигатели используются для коррекции скорости или орбиты полета КА, то они работают непрерывно от нескольких секунд до нескольких минут. Столь широкий диапазон импульсных и непрерывных режимов обеспечивают ЖРДМТ, работающие на самовоспламеняющемся двухкомпонентном топливе: азотный тетраоксид (АТ) и несимметричный диметилгидразин (НДМГ).

Создание совершенного ЖРДМТ с низким уровнем тяги, работающего с высокой степенью эффективности как в непрерывном, так и в импульсных режимах, представляет весьма сложную техническую проблему. Главная трудность заключается в малых значениях расходов топлива в ЖРДМТ, составляющих на 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.

Такие малые расходы топлива 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 огневой стенки камеры двигателя от прогара и эрозии при контакте с высокотемпературными продуктами сгорания.

Одним из возможных путей решения этой задачи является организация у огневой стенки камеры низкотемпературного пристеночного слоя продуктов сгорания. Высокая экономичность двигателя при условии надежного внутреннего охлаждения может быть получена лишь при размещении большого числа топливных форсунок с очень малым расходом компонентов на смесительной головке малых геометрических размеров. Поскольку такие смесительные головки практически невозможно реализовать, то обычно на головке ЖРДМТ размещается сравнительно небольшое количество форсунок, а при малых тягах - один смесительный элемент. В результате неизбежно ухудшаются показатели экономичности рабочего про-

цесса из-за появления в камере двигателя крупномасштабной неравномерности распределения компонентов по поперечному сечению камеры сгорания.

Достаточно типичной является схема смесеобразования в ЖРДМТ, формирующая двухзонную эпюру распределения компонентов. В приосевой центральной зоне (ядре) потока создается топливная смесь с соотношением компонентов, близким к стехиометрическому, а в пристеночной зоне у огневой стенки подается в избытке либо горючее, либо окислитель. Чаще в избытке подается горючее.

Подача окислителя в камеру сгорания обычно осуществляется через одну или несколько форсунок, что определяется величиной расхода окислителя, только в центральную зону – ядро потока. Горючее подается через форсунки, расположенные ближе к периферии смесительной головки, на стенку камеры и в ядро потока. Это делается с целью создания низкотемпературного пристеночного слоя, высокотемпературного ядра потока. Количество форсунок зависит от расхода горючего. Располагаться они могут в один или несколько рядов. С увеличением тяги двигателя возрастает величина расхода горючего, что облегчает решение задачи охлаждения огневой стенки камеры. 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.

Третья отличительная особенность ЖРДМТ заключается в необходимости надежно работать в условиях космического пространства в течение длительного времени, исчисляемого более десяти лет.

Эту особенность ЖРДМТ необходимо учитывать при проектировании новых двигателей – особенно при выборе конструкционных материалов, проведении оценочных расчетов на прочность и надежность. Необходимо учитывать длительное воздействие на ЖРДМТ всех факторов космического пространства.

Испытания ЖРДМТ на земле необходимо проводить на специальных стендах, которые в максимальной степени имитируют условия космического пространства.

Целью испытаний двигателя является получение исчерпывающей информации, позволяющей сделать вывод о его функционировании в заданном диапазоне изменения различных воздействующих

факторов. Проведение экспериментального исследования предполагает выполнение достаточно широкого комплекса измерений параметров двигателя, характеризующих его работу в условиях, наиболее 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.

### **1.3 Режимы работы ЖРДМТ и их классификация**

Основной отличительной особенностью ЖРДМТ является их способность работать как в непрерывном, так и в импульсном режиме.

Непрерывным режимом работы ЖРДМТ считается режим однократного включения двигателя такой продолжительности, начиная с которой удельный импульс тяги практически становится независимым от времени включения двигателя. Для большинства созданных и эксплуатируемых двухкомпонентных ЖРДМТ минимальная длительность включения, с которой начинается непрерывный режим, находится в пределах от 0,5 до 1,0 с. Максимальная продолжительность непрерывного режима работы может составлять десятки минут.

Импульсным режимом работы называют режим многократных кратковременных включений ЖРДМТ, при котором удельный импульс тяги в общем случае зависит от времени включения, порядкового импульса в серии и частоты включений. У большинства существующих двухкомпонентных ЖРДМТ время включения при импульсном режиме работы составляет от 0,03 до 1,00 с.

Импульсный режим работы ЖРДМТ по зависимости удельного импульса тяги от порядкового номера включения в серии бывает:

- установившийся;
- неуставившийся.

Установившимся считают такой импульсный режим работы ЖРДМТ, при котором удельный импульс тяги не зависит от порядкового номера включения.

На неустановившемся импульсном режиме работы ЖРДМТ удельный импульс тяги зависит от порядкового номера его включения.

Большое место в циклограмме работы занимает режим одиночных включений ЖРДМТ.

Режим одиночных включений ЖРДМТ – это импульсный режим работы двигателя с паузами между включениями, в течение которых двигатель приходит в исходное состояние. В двигателе полностью опорожняются заклапанные полости и устанавливается начальное тепловое состояние элементов конструкции. Удельный импульс тяги в режиме одиночных включений имеет при одинаковом времени включения минимальное значение среди всех импульсных режимов работы.

Импульсные режимы работы ЖРДМТ по типу взаимосвязи между отдельными включениями бывают:

- со связанными импульсами;
- перекрывающимися импульсами.

Режим работы ЖРДМТ со связанными импульсами это такой импульсный режим, при котором между отдельными включениями происходит обмен тепловой энергией, т.е. двигатель не успевает охладиться за время паузы до исходной температуры. На этом режиме удельный импульс тяги будет расти от импульса к импульсу.

Импульсный режим работы ЖРДМТ с перекрывающимися импульсами отличается тем, что между отдельными включениями происходит обмен не только тепловой энергией, но и рабочим телом (массой), т.к. камера двигателя не успевает полностью опорожниться от продуктов сгорания предыдущего включения, а в неё начинает поступать топливо следующего включения двигателя. Удельный импульс тяги на этом режиме будет расти от импульса к импульсу значительно быстрее, чем на режиме со связанными импульсами.

Циклический режим работы ЖРДМТ состоит из повторяющихся в процессе эксплуатации сочетаний непрерывных и импульсных режимов. Циклический режим используется при выполнении КА одинаковых операций ориентации, маневра и коррекции.

## 1.4 Устройство и принцип работы однокомпонентного ЖРДМТ

Однокомпонентные ЖРДМТ проще двухкомпонентных по конструкции, дешевле и надежнее, но уступают им по удельным и динамическим параметрам. Эксплуатируемые однокомпонентные ЖРДМТ имеют нижний уровень тяги 0,09 Н, а двухкомпонентные – 0,4 Н. Число включений и время работы у них примерно те же, что и у двухкомпонентных ЖРДМТ

Топливом большинства созданных и эксплуатируемых однокомпонентных ЖРДМТ являются гидразин ( $N_2H_4$ ) или перекись водорода ( $H_2O_2$ ) [1, 2, 11, 12].

Рассмотрим устройство и принцип работы однокомпонентного термокаталитического ЖРДМТ разработки ОКБ «Факел», конструктивная схема которого представлена на рисунке 1.2 [13].

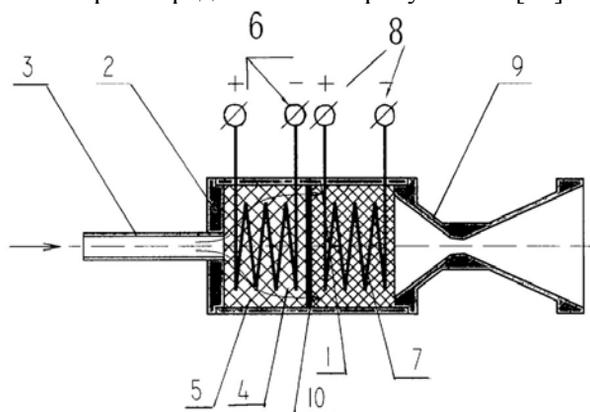


Рисунок 1.2 – Конструктивная схема однокомпонентного термокаталитического ЖРДМТ: 1 – камера разложения топлива; 2 – днище камеры; 3 – узел подвода топлива; 4 – испаритель; 5 – проникаемый каталитически неактивный электропроводящий материал; 6, 8 – токоподводы; 7 – термокаталитический пакет; 9 – сопло; 10 – проникаемый слой материала с большим термическим сопротивлением

В ДУ с ЖРДМТ используется вытеснительная подача топлива, на входе в узел подвода топлива 3 двигателя установлен электромагнитный топливный клапан (на рисунке 1.2 он не показан).

Двигатель содержит камеру разложения топлива 1 с днищем 2, примыкающий к днищу камеры узел подвода топлива 3, испаритель

4, выполненный из проницаемого каталитически неактивного электропроводящего материала 5, снабженного токоподводами 6, термокаталитический пакет 7, снабженный токоподводами 8, и сопло Лаваля 9. В камере 1 между узлом подвода топлива и термокаталитическим пакетом установлен проницаемый слой материала с большим термическим сопротивлением 10.

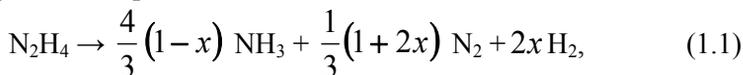
Работа двигателя осуществляется следующим образом.

По команде подготовки выполняется подача электроэнергии на токоподводы 8 и 6 для предварительного разогрева термокаталитического пакета 7, например до температуры 400 °С, и материала 5 испарителя 4 – до температуры 220 °С.

После разогрева термокаталитического пакета 7 и испарителя 4 жидкое ракетное топливо (например, гидразин) из топливного бака ДУ под необходимым давлением подводится по трубопроводу системы хранения и подачи к входному штуцеру электромагнитного топливного клапана. В требуемый момент система управления КА вырабатывает управляющий электрический сигнал на включение ЖРДМТ. Этот сигнал подается на электрическую обмотку электромагнитного клапана. Через промежуток времени, равный времени начала открытия клапана, клапан открывается, топливо подается через примыкающий к днищу 2 узел подвода топлива 3 и поступает в испаритель 4. В момент поступления топлива напряжение на токоподводах 6 испарителя повышают, при этом максимальный уровень напряжения определяют из условия подвода электроэнергии, достаточной для испарения и перегрева паров поступающего расхода топлива до температуры, не превышающей температуры потери термостабильности данного топлива. В результате теплообмена с материалом испарителя поток жидкого ракетного топлива нагревается и испаряется. Поскольку дополнительная энергия подводится к рабочему телу на участке камеры с минимальным перепадом температур с окружающей средой, то уровень тепловых потерь незначителен, а поскольку дополнительного преобразования продуктов разложения не происходит, то время пребывания продуктов разложения в камере минимально. После испарения пары топлива через слой материала 10 подаются в термокаталитический пакет 7. В термокаталитическом пакете 7 пары топлива разлагаются при оптимальном соотношении компонентов, составляющих продукты разложения, продукты разложения нагреваются выделяющейся при разложении хими-

ческой энергией и затем высокотемпературные продукты разложения перемещаются в газодинамическое сопло 9, истекая через которое, струя продуктов разложения создает реактивную тягу.

При использовании в качестве топлива гидразина он будет интенсивно разлагаться в камере термического разложения в соответствии с уравнением реакции



где  $x$  – степень разложения аммиака, определяющая содержание в продуктах разложения  $\text{N}_2$  и  $\text{H}_2$ . Степень разложения аммиака колеблется в широких пределах. Она в основном определяется способом организации составляющих рабочего процесса разложения гидразина в камере, свойствами и температурой катализатора. Так, например, термическое разложение при температуре в камере 550 К дает  $x = 0,06$ .

На рисунке 1.3 представлены зависимости идеального удельного импульса в пустоте  $I_{y,нид}$  при двух степенях расширения РТ в сопле  $\varepsilon = 20$  и 1000 и температуры продуктов разложения гидразина  $T$  от степени разложения аммиака  $x$ . Видно, что ЖРДМТ на гидразине имеют достаточно низкий удельный импульс тяги ( $I_{y,n} < 2400$  м/с). Это говорит об их низкой экономичности по сравнению с ЖРДМТ на двухкомпонентных топливах.

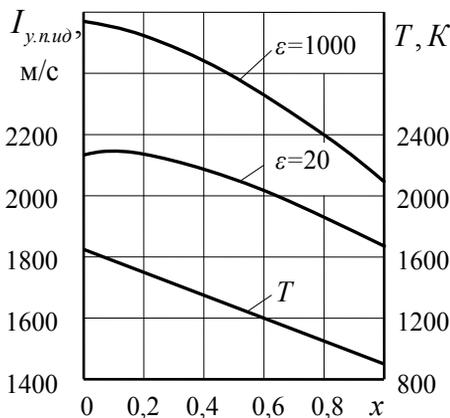


Рисунок 1.3 – Зависимости идеального удельного импульса в пустоте и температуры продуктов разложения гидразина от степени разложения аммиака

Гидразин по  $I_{y,нид}$  превосходит перекись водорода, у которой при концентрации 97%  $I_{y,нид} = 1800$  м/с. Гидразиновые двигатели

имеют преимущество и в эксплуатации, т.к. перекись водорода может разлагаться при контакте со многими конструкционными материалами, грязью, жиром.

У гидразиновых ЖРДМТ тягой менее 0,4 Н диаметр сопла форсунки, подающей в камеру и распыляющей жидкий гидразин, очень мал. Появляется возможность засорения форсунки, поэтому в некоторых двигателях гидразин до подачи в камеру газифицируют.

С повышением температуры катализатора динамические параметры ЖРДМТ улучшаются, поэтому каталитический пакет подогревается в период паузы между включениями двигателя электронагревателем. Одним из лучших инициаторов разложения гидразина является катализатор, выполненный в виде пористых зерен окиси алюминия размером 1,0...2,5 мм с сильно развитой поверхностью, покрытых иридием. Данный катализатор обладает высокой каталитической способностью и термостойкостью, малым термическим расширением, хорошими теплопроводностью и механическими свойствами.

Несмотря на низкую экономичность по сравнению с двухкомпонентными двигателями, использование гидразиновых ЖРДМТ тягой 0,1...0,4 Н вполне оправданно, поскольку изготовление двухкомпонентных ЖРДМТ с такой тягой сопряжено с большими техническими и технологическими трудностями.

## **1.5 Устройство и принцип работы двухкомпонентного ЖРДМТ**

Двухкомпонентные ЖРДМТ нашли в настоящее время наибольшее распространение по сравнению с однокомпонентными, т.к. они превосходят последние по удельным и динамическим параметрам. Выбор топлива для ЖРДМТ значительно ограничен из-за ряда отличительных особенностей рабочего процесса и эксплуатации по сравнению с маршевыми ЖРД. Современные двухкомпонентные ЖРДМТ используют в качестве окислителей азотный тетраоксид ( $N_2O_4$ , АТ) или кислород ( $O_2$ ), а в качестве горючих – несимметричный диметилгидразин ( $H_2N-N(CH_3)_2$ , НДМГ), гидразин ( $N_2H_4$ ), монометилгидразин ( $H_2N-NH(CH_3)$ ), керосин ( $C_{7,21}H_{13,29}$ ), этиловый спирт ( $C_2H_5OH$ ), водород ( $H_2$ ). Штатным топливом двухкомпонент-

ных ЖРДМТ являются АТ и НДМГ. Реализованный нижний уровень тяги составляет 0,4Н, минимальная длительность включения – 30 мс, число включений достигает миллиона, а общее время работы – десятков часов.

Если используются несамовоспламеняющиеся топлива, то для воспламенения топливной смеси в камере сгорания при запуске двигателя применяются, главным образом, электроискровые, пьезоэлектрические или калильные системы воспламенения.

В качестве примера конструкции двухкомпонентного ЖРДМТ на рисунке 1.4 показан общий вид двигателя 11Д428АФ-16 тягой 123,5 Н разработки и производства ФГУП «НИИМАШ» [14], работающего на самовоспламеняющихся компонентах топлива АТ и НДМГ. Этот двигатель предназначен для использования в составе двигательной установки возвращаемого аппарата, используемого в международной программе "Фобос-Грунт".

Рассмотрим одну из конструктивных схем двухкомпонентного ЖРДМТ разработки ФГУП «НИИМАШ», которая представлена на рисунке 1.5 [15], и принцип работы двигателя.

Двигатель работает на самовоспламеняющихся компонентах топлива, в его ДУ используется вытеснительная подача топлива. На входе в двигатель установлены электромагнитные клапаны окислителя и горючего (на рисунке 1.5 они не показаны). ЖРДМТ состоит из смеситель-



Рисунок 1.4 – ЖРДМТ 11Д428АФ-16:  
1 – трубопровод подачи окислителя;  
2 – трубопровод подачи горючего;  
3 – сигнализатор давления; 4 – штепсельный разъем; 5 – пенопластовая теплоизоляция; 6 – смесительная головка; 7 – камера сгорания; 8 – сверхзвуковое сопло

ной головки 1 и камеры 2. Смесительная головка включает в себя корпус, подводящие каналы окислителя 3 и горючего 4, коллекторы горючего 5 и окислителя 6, втулку 7 с тангенциальными отверстиями 8 центробежной форсунки окислителя и серией равномерно расположенных по периферии струйных форсунок окислителя 9, питающихся из коллектора 6, стержень 10 с тангенциальными отверстиями центробежной форсунки горючего. Стержень 10 установлен в корпусе таким образом, что тангенциальные отверстия

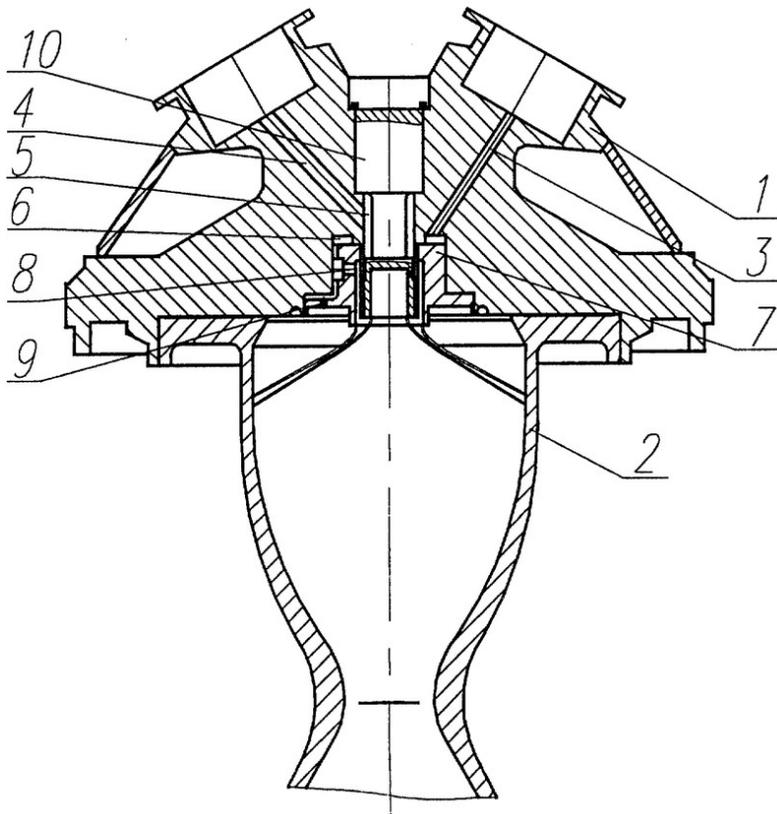


Рисунок 1.5 – Конструктивная схема двухкомпонентного ЖРДМТ: 1 – смесительная головка; 2 – камера двигателя; 3 – канал окислителя; 4 – канал горючего; 5 – коллектор горючего; 6 – коллектор окислителя; 7 – втулка; 8 – тангенциальные отверстия центробежной форсунки окислителя; 9 – струйные форсунки; 10 – стержень с тангенциальными отверстиями центробежной форсунки горючего

центробежной форсунки горючего находятся в зоне или ниже плоскости расположения тангенциальных отверстий 8 центробежной форсунки окислителя. При этом геометрическая характеристика внутренней центробежной форсунки максимально приближена к геометрической характеристике наружной центробежной форсунки, соответственно величина угла конуса распыла горючего максимально приближена к величине угла конуса распыла окислителя, а столкновение конусов распыла горючего и окислителя происходит в корневой зоне последнего.

ЖРДМТ работает следующим образом.

Жидкие компоненты из топливных баков ДУ под необходимым давлением подводятся по трубопроводам системы хранения и подачи к входным штуцерам электромагнитных топливных клапанов горючего и окислителя. В требуемый момент система управления КА вырабатывает управляющий электрический сигнал на включение ЖРДМТ. Этот сигнал подается на электрическую обмотку электромагнитных топливных клапанов. Через промежуток времени, равный времени задержки начала открытия, клапаны горючего и окислителя открываются. Компоненты топлива, проходя по подводным каналам окислителя 3 и горючего 4, попадают в коллекторы окислителя 6 и горючего 5. Далее окислитель из коллектора 6 распределяется и подводится к тангенциальным отверстиям 8 центробежной форсунки и струйным форсункам 9, расположенным на втулке 7, горючее из коллектора 5 подводится к тангенциальным отверстиям центробежной форсунки горючего. Тангенциально закрученные окислитель и горючее, вытекая из соответствующих камер закручивания центробежных форсунок в виде полых конусов, сталкиваются в корневой зоне конуса окислителя и перемешиваются в жидкой фазе. Струи окислителя, вытекая из струйных форсунок 9, пронизывают конуса окислителя и горючего, дополнительно интенсифицируя процессы перемешивания в жидкой фазе и горения компонентов топлива, попадают на стенку камеры сгорания и, растекаясь по ней, образуют защитное внутреннее пленочное охлаждение стенки камеры.

Для достижения высокой эффективности преобразования двухкомпонентного самовоспламеняющегося жидкого ракетного топлива необходимым условием является обеспечение эффективной организации жидкофазного взаимодействия компонентов [16-18]. Органи-

зация жидкофазного взаимодействия компонентов играет ведущую роль в обеспечении высокой эффективности внутрикамерных рабочих процессов ЖРДМТ. В процессе жидкофазного взаимодействия компонентов топлива происходит протекание следующих основных физико-химических процессов: жидкофазного смешения компонентов, экзотермических химических жидкофазных реакций и образования жидкофазных и газофазных промежуточных продуктов (ЖФПП и ГФПП). Для достижения максимальной эффективности жидкофазного взаимодействия компонентов топлива необходимо обеспечить полное смешение компонентов в жидкой фазе до начала жидкофазных реакций, период индукции которых составляет для компонентов топлива АТ и НДМГ  $\sim 0,5 \times 10^{-4}$  с [17].

В камере сгорания через время, равное периоду задержки самовоспламенения  $\tau_{3,6}$ , происходит воспламенение ГФПП. Жидкофазные промежуточные продукты и непрореагировавшие в жидкой фазе компоненты испаряются (газифицируются), перемешиваются в газовой фазе и газофазные продукты, включая ГФПП, сгорают. При сгорании топлива его химическая энергия преобразуется в тепловую в виде образования продуктов сгорания с высокой температурой. Эта высокотемпературная газовая смесь продуктов сгорания топлива поступает в сопло Лавалия камеры 2. Здесь рабочее тело ускоряется. Его потенциальная и тепловая энергии преобразуются в кинетическую энергию струи продуктов сгорания, вытекающей из сопла со сверхзвуковой скоростью и создающей реактивную силу тяги.

В «КБхиммаш им. А.М.Исаева» - филиале ФГУП «ГКНПЦ им. М.В.Хруничева» разработан ряд ЖРДМТ на самовоспламеняющихся компонентах топлива АТ и НДМГ, использующих смесительный элемент с дефлекторно-центробежной схемой жидкофазного смешения компонентов на внутренней стенке камеры сгорания [19, 20]. Данные ЖРДМТ номинальной тягой 25, 50, 100 и 200 Н применяются на КА разработки НПО им. С.А.Лавочкина, ГНПРКЦ «ЦСКБ «Прогресс», КБ «Салют» и РКК «Энергия» для пилотируемого корабля «Союз-ТМА», по теме «Луна-Глоб», в модулях международной космической станции. Все эти ЖРДМТ обеспечивают высокий удельный импульс, работоспособность при больших ресурсах и высокую надежность, обусловленную значительным запасом по температуре элементов двигателей при их работе.

Конструктивная схема смесительного элемента этих ЖРДМТ представлена на рисунке 1.6 [19].

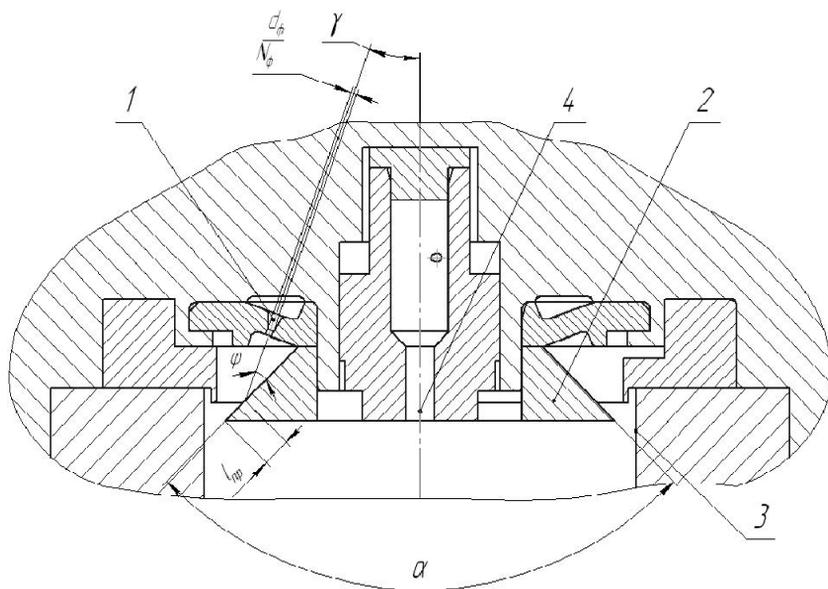


Рисунок 1.6 – Конструктивная схема смесительного элемента с дефлекторно - центробежной схемой жидкофазного смешения компонентов: 1 – струйные форсунки окислителя; 2 – конический дефлектор; 3 – внутренняя поверхность стенки камеры сгорания; 4 – центробежная форсунка горючего

Рассматриваемая конструкция смесительного элемента работает следующим образом. Окислитель через струйные форсунки 1 диаметром 0,2...0,4 мм (в зависимости от размерности двигателя) попадает на конический дефлектор 2, где струя преобразуется в первичную пленку, которая, стекая с кромки дефлектора 2, попадает на внутреннюю поверхность стенки камеры сгорания 3, преобразуется во вторичную пленку и течет по внутренней поверхности стенки камеры сгорания 3 до места встречи с пленкой горючего, которая попадает на внутреннюю поверхность стенки камеры сгорания через факел распыла центробежной форсунки горючего 4, соосной с камерой сгорания. От места столкновения пленки окислителя и горючего, соприкоснувшись, продолжают течь по стенке камеры сгорания, одновременно взаимно проникая друг в друга и осуществляя жид-

кофазное смешение самовоспламеняющихся компонентов с образованием продуктов преобразования топлива. Практически все топливо попадает на внутреннюю поверхность стенки камеры сгорания, участвует в ее охлаждении и перераспределении значительной части теплового потока, направленного по стенке камеры от минимального (критического) сечения камеры в сторону смесительной головки.

Анализ путей совершенствования ЖРДМТ показывает [18], что современным перспективным направлением по созданию ЖРДМТ нового поколения является разработка двигателей малой тяги с минимальными значениями приведенной длины камеры сгорания при обеспечении предельных значений параметров на непрерывном режиме, что должно привести к существенному повышению удельного импульса тяги в импульсном режиме, снижению температуры камеры двигателя, улучшению динамических и экологических характеристик двигателей и повышению их надежности. Реализация данного направления возможна за счет совершенствования организации внутрикамерных рабочих процессов ЖРДМТ.

Ведущую роль в совершенствовании внутрикамерных рабочих процессов ЖРДМТ на самовоспламеняющемся топливе играет организация эффективного экзотермического жидкофазного взаимодействия компонентов при запуске двигателя, его работе в импульсном и непрерывном режимах [16-18]. Эффективная организация жидкофазного взаимодействия компонентов топлива будет решающим образом обеспечивать интенсификацию протекания последующих процессов преобразования топлива в высокотемпературные продукты сгорания и, как следствие, будет определять высокий уровень динамических и энергетических характеристик двигателя. Повышение надежности связано со снижением тепловых нагрузок к элементам конструкции ЖРДМТ за счет использования жидкофазных промежуточных продуктов взаимодействия компонентов в качестве пристеночного внутреннего охладителя и одновременного уменьшения длины камеры сгорания двигателя.

Перспективным направлением повышения эффективности внутрикамерных рабочих процессов ЖРДМТ можно считать путь использования в двигателях предкамерных устройств [18]. Достоинства предкамер с точки зрения интенсификации внутрикамерного рабочего процесса ЖРДМТ состоят в том, что они позволяют управлять рабочим процессом при ограниченном количестве смеситель-

ных элементов и влиять на эффективность протекания различных его стадий. Предкамера может интенсифицировать внутрикамерный рабочий процесс за счет:

- организации эффективного жидкофазного смешения компонентов топлива, в том числе на стенке предкамеры;
- создания благоприятных условий для жидкофазных экзотермических реакций с образованием высокоактивных жидкофазных и газофазных промежуточных продуктов;
- обеспечения заданного распределения ЖФПП и ГФПП по поперечному сечению камеры сгорания;
- организации эффективного дробления жидкофазных продуктов на выходе из предкамеры;
- интенсификации газофазного перемешивания ГФПП в камере сгорания.

Кроме того, предкамера может выполнять функции теплового моста между камерой сгорания и смесительной головкой двигателя, особенно это актуально для двигателей малых тяг.

Для ЖРДМТ тягой менее 1,0 Н, являющихся перспективным классом двигателей для систем управления малых КА, по сравнению с ЖРДМТ тягой от 10 до 1600 Н выявлен ряд особенностей по организации внутрикамерного рабочего процесса [18], которые необходимо учитывать при их проектировании:

- наличие одного смесительного элемента;
- использование в качестве форсунок прежде всего струйных форсунок-капилляров с внутренним диаметром (0,15 – 0,3) мм и с большими относительными длинами – более 20;
- проблемы с обеспечением стабильности гидравлических характеристик капиллярных смесительных элементов из-за значительных тепловых потоков в смесительную головку и возможной облитерации капиллярных каналов;
- сложности в эффективной организации жидкофазного смешения компонентов топлива;
- значительные потери удельного импульса тяги из-за неадиабатности процессов в камере;
- особые условия организации тепловой защиты смесительной головки и стенок камеры сгорания.

## 2 ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖРДМТ

Характеристиками ЖРДМТ называют зависимости его выходных параметров от внешних и внутренних параметров, определяющих работу двигателя.

Зависимости, связывающие указанные параметры при работе двигателя на установившемся режиме работы, называют статическими характеристиками, а на неустановившихся режимах, таких как запуск, останов, импульсный – динамическими.

К выходным параметрам ЖРДМТ относятся тяга, импульс тяги, удельный импульс тяги и другие.

К внешним параметрам – давление и температура компонентов топлива на входе в двигатель, их плотность, давление, температура и влажность окружающей среды, температура конструкции, положение регулирующих органов.

Внутренними параметрами ЖРДМТ являются давление в камере сгорания, массовые расходы, соотношение компонентов топлива и другие параметры внутрикамерных процессов, отклонение размеров и формы гидравлических трактов агрегатов и трубопроводов от проектных, точность изготовления элементов двигателя, чистота обработки поверхностей деталей и т.д.

Наиболее существенное влияние на тягу, импульс тяги и удельный импульс ЖРДМТ оказывают следующие параметры:

- массовый расход топлива;
- давление в камере сгорания;
- соотношение компонентов топлива;
- давление окружающей среды или, что то же самое, высота полета (орбиты);
- длительность включения двигателя;
- порядковый номер следования импульса;
- частота следования импульсов.

### 2.1 Статические характеристики

Наибольший практический интерес представляют три статические характеристики ЖРДМТ:

- ✓ по составу топлива;

- ✓ дроссельная;
- ✓ высотная.

### 2.1.1 Характеристика по составу топлива

Характеристика ЖРДМТ по составу топлива – это зависимость тяги, импульса тяги, удельного импульса тяги и других выходных параметров двигателя от соотношения компонентов или коэффициента избытка окислителя при постоянных давлениях в камере сгорания и окружающей среды. В формализованном виде это запишется

$$P, I_u, I_y = f(K_m) \text{ или } P, I_u, I_y = f(\alpha_{ок}) \text{ при } p_k, p_n = \text{const} . \quad (2.1)$$

Жидкостный ракетный двигатель рассчитывается на некоторый определенный состав топлива, отвечающий номинальным значениям давлений окислителя  $p_{\text{вх.ок}}$  и горючего  $p_{\text{вх.г}}$  на входе в двигатель. В условиях эксплуатации возможно отклонение этих значений давлений от номинальных, что приводит к изменению состава топлива и, как следствие, к изменению выходных параметров двигателя.

Существенное изменение состава топлива, а значит и выходных параметров, наблюдается в ЖРДМТ, имеющих низкое давление в камере сгорания и, следовательно, более низкие значения давлений подачи компонентов топлива.

Двухкомпонентное жидкое топливо состоит из окислителя и горючего.

Горючим называют компонент топлива, содержащий преимущественно элементы с электроположительной валентностью (Н, С, В, Al) и некоторые другие.

Окислителем называют компонент топлива, содержащий преимущественно элементы с электроотрицательной валентностью (О, F, Cl) и некоторые другие.

Компоненты топлива могут подаваться в камеру двигателя с любым массовым расходом, определяя действительный состав топливной смеси в камере сгорания. Фактический (действительный) состав топливной смеси в камере сгорания ракетного двигателя определяется массовым действительным соотношением компонентов

$$K_m = \frac{\dot{m}_{ок}}{\dot{m}_г}, \quad (2.2)$$

где  $\dot{m}_{ок}$  и  $\dot{m}_г$  – массовые расходы окислителя и горючего в камеру сгорания ЖРДМТ соответственно.

Чаще на практике для определения состава топлива используется коэффициент избытка окислителя  $\alpha_{ок}$ , представляющего собой отношение массового действительного соотношения компонентов  $K_m$  к массовому стехиометрическому соотношению компонентов  $K_m^o$ :

$$\alpha_{ок} = \frac{K_m}{K_m^o}. \quad (2.3)$$

Стехиометрическое массовое соотношение компонентов

$$K_m^o = \alpha^o \frac{\mu_{ок}}{\mu_г}, \quad (2.4)$$

где  $\alpha^o$  – мольное стехиометрическое соотношение компонентов топлива;  $\mu_{ок}$  и  $\mu_г$  – молярные массы окислителя и горючего соответственно.

На практике для описания состава топлива удобнее пользоваться коэффициентом избытка окислителя. При стехиометрическом соотношении компонентов  $\alpha_{ок} = 1$ . Когда  $\alpha_{ок} > 1$ , топливная смесь содержит в избытке окислитель, а когда  $\alpha_{ок} < 1$  – горючее.

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

Мольное стехиометрическое соотношение компонентов топлива  $\alpha^o$  равно количеству молей окислителя, которое необходимо подать на один моль горючего, чтобы произошло полное замещение валентностей горючих элементов валентностями окислительных элементов, т.е. произошло полное сгорание этого одного моля горючего.

Если имеются условные химические формулы окислителя и горючего, то величина  $\alpha^o$  определяется по уравнению

$$\alpha^0 = - \frac{\sum_{i=1}^m b_{i,\Gamma} \nu_i}{\sum_{i=1}^m b_{i,OK} \nu_i}, \quad (2.5)$$

где  $\sum_{i=1}^m b_{i,\Gamma} \nu_i$  – число свободных электроположительных валентностей в одной молекуле горючего;  $\sum_{i=1}^m b_{i,OK} \nu_i$  – число свободных электроотрицательных валентностей в одной молекуле окислителя;  $\nu_i$  – высшая валентность  $i$ -го химического элемента;  $b_{i,OK}$  и  $b_{i,\Gamma}$  – число атомов  $i$ -го химического элемента в условной молекуле окислителя и горючего соответственно.

Массовое стехиометрическое соотношение компонентов топлива  $K_m^0$  равно количеству килограммов окислителя, которое необходимо подать на один килограмм горючего, чтобы произошло полное замещение валентностей горючих элементов валентностями окислительных элементов, т.е. произошло полное сгорание этого одного килограмма горючего.

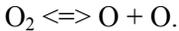
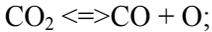
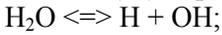
Состав топливной смеси, соответствующий такому соотношению компонентов топлива, называется стехиометрическим. Стехиометрической топливной смеси соответствует наибольший тепловой эффект окислительно-восстановительной реакции (реакции горения), протекающей в камере сгорания между компонентами топлива.

Состав топлива определяет количество тепла, выделившегося в камере сгорания при его сжигании, химический состав продуктов сгорания, их молекулярную массу и температуру, т.е. работоспособность рабочего тела, поступающего из камеры сгорания в сопло.

При отклонении значения массового действительного соотношения компонентов  $K_m$  от стехиометрического  $K_m^0$  тепловой эффект реакции горения топлива уменьшается. Это объясняется наличием в топливной смеси избыточных окислительных элементов при

$K_m > K_m^o$  ( $\alpha_{ок} > 1$ ) или горючих элементов при  $K_m < K_m^o$  ( $\alpha_{ок} < 1$ ), не принимающих участия в химической реакции горения.

Если бы в результате горения топлива действительно образовывались только продукты полного окисления, то стехиометрической топливной смеси соответствовала бы максимальная температура продуктов сгорания. Она могла бы достигать чрезвычайно высоких значений. Так, например, для стехиометрической смеси  $H_2$  и  $O_2$  температура недиссоциированных продуктов сгорания составила бы 7250 К. Однако реально на практике максимальные температуры продуктов сгорания жидких ракетных топлив не превышают 3500...4500 К. Это объясняется тем, что при температурах выше 2000...2500 К начинается диссоциация продуктов сгорания. Если в продуктах сгорания содержатся вещества  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $O_2$ , то в рабочем теле будут протекать следующие реакции диссоциации:



При бóльших температурах в рабочем теле наряду с реакциями диссоциации начинают протекать и реакции ионизации.

Реакции диссоциации и ионизации эндотермические, т.е. они идут с поглощением тепла, что ведет к снижению температуры про-

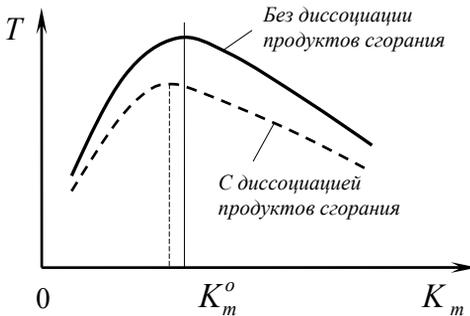


Рисунок 2.1 – Зависимость температуры продуктов сгорания от массового соотношения компонентов топлива

дуктов сгорания на входе в сопло и смещению максимума температуры, причем для большинства жидких ракетных топлив в область значений

$K_m < K_m^o$  ( $\alpha_{ок} < 1$ ) (см. кривые на рисунке 2.1).

Степень диссоциации продуктов сгорания при данном составе топлива зависит от давления в камере сгора-

ния  $p_k$ . При повышении давления степень диссоциации продуктов сгорания снижается, а температура их на выходе из камеры сгорания увеличивается. Массовое соотношение компонентов, при котором температура продуктов сгорания достигает максимума, приближается к стехиометрическому его значению.

От состава топлива, определяемого массовым действительным соотношением компонентов  $K_m$  или коэффициентом избытка окислителя  $\alpha_{ок}$ , зависят состав рабочего тела, его термодинамические и теплофизические свойства, а значит и выходные параметры двигателя, такие как тяга на непрерывном режиме, импульс тяги при коротком включении, удельный импульс тяги и другие.

Удельный импульс тяги ЖРДМТ на непрерывном режиме

$$I_y = \frac{P}{\dot{m}} = w_a + \frac{(p_a - p_n)F_a}{\dot{m}}, \quad (2.6)$$

где  $P$  – тяга двигателя;  $\dot{m}$  – массовый расход топлива;  $F_a$  – площадь сечения сопла на выходе;  $p_a$  – статическое давление РТ на срезе сопла;  $p_n$  – давление окружающей среды;  $w_a$  – скорость продуктов сгорания в выходном сечении сопла.

На расчетном режиме, когда  $p_a = p_n$ , имеем

$$I_{y.p} = w_a. \quad (2.7)$$

Из выражений (2.6) и (2.7) видно, что значение  $I_y$  определяется в основном величиной скорости  $w_a$ , причем зависимость  $I_y = f(\alpha_{ок})$  аналогична зависимости  $w_a = f(\alpha_{ок})$ . Из газовой динамики уравнение для определения скорости рабочего тела в выходном сечении сопла Лавалья имеет вид:

$$w_a = \sqrt{\frac{n}{n-1} R_{o.c} T_{o.c} \left[ 1 - \left( \frac{p_a}{p_{o.c}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}, \quad (2.8)$$

где  $n$  – средний показатель изоэнтропы расширения;  $R_{o.c}$  – удельная газовая постоянная рабочего тела по параметрам торможения на

входе в сопло;  $T_{oc}$  – температура торможения продуктов сгорания на входе в сопло;  $p_{oc}$  – давление торможения на входе в сопло;  $p_a$  – статическое давление РТ в выходном сечении сопла.

Из выражения (2.8) следует, что при определенном значении

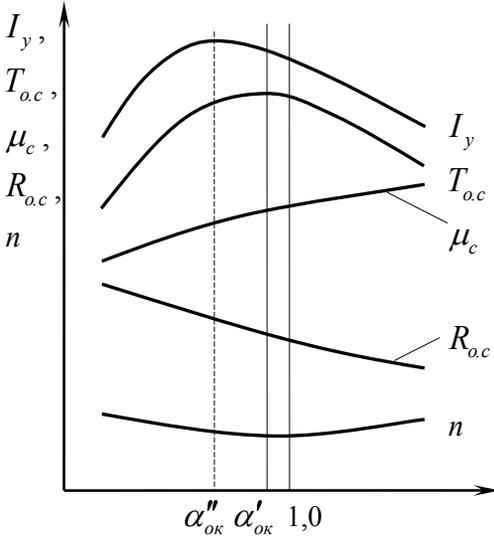


Рисунок 2.2 – Зависимость удельного импульса тяги  $I_y$ , температуры торможения РТ на входе в сопло  $T_{oc}$ , молярной массы  $\mu_c$ , газовой постоянной продуктов сгорания  $R_{oc}$  от коэффициента избытка окислителя  $\alpha_{ок}$

степени расширения рабочего тела в сопле

$\varepsilon = p_{oc}/p_a$  скорость истечения  $w_a$  и, соответственно, удельный импульс тяги  $I_y$  зависят от состава рабочего тела ( $n$ ), его газовой постоянной  $R_{oc}$  и температуры  $T_{oc}$  на входе в сопло.

Изменение этих величин  $R_{oc}$ ,  $T_{oc}$  и  $n$  от коэффициента избытка окислителя  $\alpha_{ок}$  показано на рисунке 2.2.

Оно приводит к тому, что удельный импульс тяги  $I_y$  достигает максимального значения при коэффициенте избытка окислителя  $\alpha''_{ок}$ , который меньше по величине коэффициента  $\alpha'_{ок}$ , соответствующего максимальной температуре продуктов сгорания  $T_{oc}$ .

Сдвиг обусловлен ростом удельной газовой постоянной рабочего тела  $R_{oc}$  при уже начавшемся снижении его температуры  $T_{oc}$ , когда движение осуществляется в

Сдвиг обусловлен ростом удельной газовой постоянной рабочего тела  $R_{oc}$  при уже начавшемся снижении его температуры  $T_{oc}$ , когда движение осуществляется в

сторону снижения  $\alpha_{ок}$ , а значит увеличения в топливной смеси избытка горючего. Зависимости  $I_y = f(\alpha_{ок})$  и  $T_{о.с} = f(\alpha_{ок})$  имеют при этом качественно одинаковый характер.

Для большинства ЖРТ, используемых в настоящее время в ЖРД, максимум  $I_y$  лежит в диапазоне значений  $\alpha_{ок} = 0,70 \dots 0,95$ , хотя, например, для топлива – жидкий кислород и жидкий водород – удельный импульс тяги  $I_y$  достигает максимума при  $\alpha_{ок} = 0,4$ .

Зависимости  $I_y = f(\alpha_{ок})$  индивидуальны для каждой топливной пары, причем даже для конкретного топлива значения  $I_y = f(\alpha_{ок})$  существенно зависят от давления в камере сгорания  $p_k$  и степени расширения продуктов сгорания в сопле  $\varepsilon = p_k / p_a$ .

В справочнике [21] приведены результаты расчета термодинамических и теплофизических свойств продуктов сгорания двухкомпонентных жидких ракетных топлив и идеальных удельных параметров ЖРД в широком диапазоне значений коэффициента избытка окислителя, давлений в камере сгорания и степеней расширения рабочего тела в сопле.

Уравнения, описывающие зависимости удельного импульса тяги  $I_y$  и других удельных параметров двигателя от коэффициента избытка окислителя, получены для идеального ЖРД, в котором отсутствуют необратимые потери энергии в камере сгорания и сопле, являются идеальными характеристиками ЖРД по составу топлива. Для конкретного двигателя, если известна площадь минимального сечения сопла  $F_M$  и геометрическая степень расширения сопла  $\bar{F}_a = F_a / F_M$ , легко можно получить идеальную зависимость тяги  $P = f(\alpha_{ок})$ . Для этого по данным термодинамического расчета определяется значение удельной площади  $f_M = F_M / \dot{m} = \beta / p_{о.с}$ , 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 использованы при проектировании двигателей.

### 2.1.2 Дроссельная характеристика

Дроссельная характеристика ЖРДМТ является основной статической эксплуатационной характеристикой. Её называют также расходной или регулировочной, подчеркивая этим возможность регулирования величины тяги двигателя.

*Дроссельная характеристика* – это зависимость тяги, удельного импульса тяги и других выходных параметров двигателя от давления в камере сгорания  $p_k$  или массового расхода топлива  $\dot{m}$  при постоянном составе топлива и давлении окружающей среды  $p_n$ . В формализованном виде это запишется:

$$P, I_u, I_y = f(p_k) \text{ или } P, I_u, I_y = f(\dot{m}) \text{ при } K_m, p_n = \text{const}. \quad (2.9)$$

Теоретическую дроссельную характеристику ЖРДМТ, совпадающую с характеристикой камеры, рассчитывают по уравнениям для тяги и удельного импульса камеры:

$$P = \dot{m} w_a + p_a F_a - p_n F_a = P_n - p_n F_a, \quad (2.10)$$

$$I_y = I_{y.n} - \frac{p_n F_a}{\dot{m}}, \quad (2.11)$$

где  $w_a$ ,  $p_a$  – скорость и статическое давление продуктов сгорания в выходном сечении сопла соответственно;  $F_a$  – площадь выходного сечения сопла;  $p_n$  – давление окружающей среды;  $P_n$  и  $I_{y.n}$  – тяга и удельный импульс тяги в пустоте.

Учитывая выражения для:

- ✓ коэффициента тяги сопла в пустоте

$$K_{T.n} = \frac{P_n}{p_{o.m} F_M \mu_c} = \frac{I_{y.n}}{c_*}, \quad (2.12)$$

- ✓ коэффициента сопла  $\varphi_c = \frac{K_{T.n}}{K_{T.n.уд}}$ , (2.13)

- ✓ давления торможения в минимальном сечении сопла

$$p_{o.m} = \sigma_f \sigma_c p_k, \quad (2.14)$$

где  $\mu_c$  – коэффициент расхода сопла;  $c_*$  – характеристическая скорость в камере;  $p_k$  – давление в камере сгорания на входе - у смешительной головки;  $F_M$  – площадь минимального сечения сопла;  $\sigma_f = p_{o.c}/p_k$ ,  $\sigma_c = p_{o.m}/p_{o.c}$  – коэффициенты восстановления полного давления в камере сгорания и в докритической части сопла соответственно, выражение (2.10) запишется:

$$P = \mu_c \varphi_c \sigma_f \sigma_c F_M K_{T.n.уд} p_k - p_n F_a. \quad (2.15)$$

Установим связь между массовым расходом топлива и давлением в камере сгорания, используя понятие характеристической скорости в камере.

$$c_* = \frac{p_{o.m} F_M \mu_c}{\dot{m}}, \quad (2.16)$$

откуда 
$$\dot{m} = \frac{\mu_c \sigma_f \sigma_c F_M p_k}{\varphi_c c_{*уд}}, \quad (2.17)$$

где  $\varphi_k = c_*/c_{*уд}$  – коэффициент камеры сгорания.

Тогда выражение (2.11) окончательно запишется:

$$I_y = \varphi_k c_{*уд} \left( \varphi_c K_{T.n.уд} - \frac{F_a}{\mu_c \sigma_f \sigma_c F_M} \frac{p_n}{p_k} \right). \quad (2.18)$$

Для камеры ЖРДМТ постоянной геометрии величины  $K_{T.n.уд}$ ,  $c_{*уд}$ ,  $\mu_c$ ,  $\sigma_f$ ,  $\sigma_c$ ,  $\varphi_k$ ,  $\varphi_c$  можно считать постоянными для всех

режимов работы. Это допущение приводит к погрешности расчета, не превышающей 3%. В этом случае можно записать:

$$P = A p_{\kappa} - p_n F_a, \quad (2.19)$$

$$I_y = B - C \frac{P_n}{p_{\kappa}} = I_{y.n} - C \frac{P_n}{p_{\kappa}}, \quad (2.20)$$

$$\dot{m} = D p_{\kappa}, \quad (2.21)$$

где  $A, B, C, D$  – постоянные величины.

Построим на рисунке 2.3 теоретическую дроссельную характеристику ЖРДМТ, используя полученные зависимости (2.19) и (2.20).

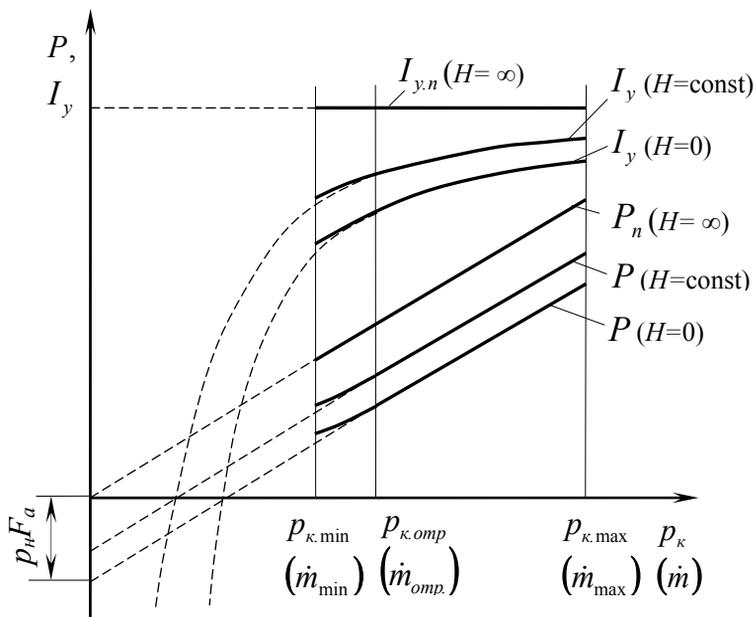


Рисунок 2.3 – Дроссельная характеристика ЖРДМТ

1.  $H = \infty$  ( $p_n = 0$ ), тогда  $P_n = A p_{\kappa}$  – прямая пропорциональная зависимость, а  $I_{y.n} = B$  – удельный импульс в пустоте постоянен и не зависит от давления в камере сгорания.

2.  $H = 0$  ( $p_n = p_{n,\max}$ ), тогда  $P = P_n - p_n F_a = A p_\kappa - p_n F_a$  – линейная зависимость, представляющая собой прямую, параллельную прямой  $P_n = A p_\kappa$  и смещенную от неё вниз на величину  $p_n F_a$ .

$$I_y = B - C \frac{P_n}{p_\kappa} = B - \frac{E}{p_\kappa}, \text{ где } E = \text{const} - \text{уравнение гиперболы с}$$

асимптотами: 1)  $I_y = I_{y,n}$  при  $p_\kappa \rightarrow \infty$ ;

$$2) p_\kappa = 0 - \text{ось ординат при } p_\kappa \rightarrow 0 (I_y \rightarrow -\infty).$$

3.  $H = \text{const}$ , ( $p_n = \text{const}$ ), тогда  $P = A p_\kappa - p_n F_a$ ,

$$I_y = B - C \frac{P_n}{p_\kappa} = B - \frac{E}{p_\kappa}. \text{ Имеем то же, что и во втором случае,}$$

только при меньшей величине давления окружающей среды  $p_n$ .

Из уравнения (2.21) следует, что массовый расход топлива  $\dot{m}$  изменяется прямо пропорционально давлению в камере сгорания  $p_\kappa$ , поэтому дроссельную характеристику можно построить по  $\dot{m}$ . Вид характеристики при этом не меняется (см. рисунок 2.3).

Дроссельную характеристику обычно получают в виде зависимости тяги и удельного импульса от давления в камере сгорания, а не от массового расхода топлива, т.к. давление в камере сгорания нагляднее характеризует изменение режима работы двигателя и точнее может быть измерено при испытаниях.

Для каждого конкретного ЖРДМТ имеется действительный диапазон реализуемой на практике дроссельной характеристики от  $p_{\kappa,\min}$  до  $p_{\kappa,\max}$ . Максимально допустимый (форсированный) режим  $p_{\kappa,\max}(\dot{m}_{\max})$  определяется прочностью и жаропрочностью камеры двигателя. На него рассчитываются все агрегаты системы подачи топлива. Режим  $p_{\kappa,\min}(\dot{m}_{\min})$  определяется порогом эффективной и устойчивой работы камеры двигателя.

Теоретическая дроссельная характеристика ЖРДМТ для случая безотрывного течения продуктов сгорания по соплу построена пунктирной линией (см. рисунок 2.3). При уменьшении  $p_\kappa$  снижа-

ется давление на срезе сопла  $p_a$ . Если отношение  $p_a/p_n$  становится меньше 0,3...0,5, то нормальная работа сопла нарушается. В сопло входит скачок уплотнения и поток продуктов сгорания отрывается от стенок сопла. Критическая величина отношения  $p_a/p_n$  зависит от состава продуктов сгорания, типа пограничного слоя (ламинарный или турбулентный) и числа Маха потока на срезе сопла. Тяга и удельный импульс тяги ЖРДМТ возрастают, т.к. из работы выключается участок сопла, создающий отрицательную тягу из-за перерасширения на нем рабочего тела. Дроссельная характеристика с отрывом потока в сопле при  $p_k < p_{k,omp}$  показана на рисунке 2.3 сплошной линией.

### 2.1.3. Высотная характеристика

*Высотная характеристика* – это зависимость тяги, удельного импульса тяги и других выходных параметров двигателя от давления окружающей среды  $p_n$  или высоты полета  $H$  при постоянном давлении в камере сгорания  $p_k$  и соотношении компонентов топлива  $K_m$ , т.е. при постоянном режиме работы двигателя. В формализованном виде это запишется:

$$P, I_y = f(p_n) \text{ или } P, I_y = f(H) \text{ при } p_k, K_m = \text{const.} \quad (2.22)$$

Важность высотной характеристики обусловлена тем, что ЖРДМТ в полете во многих случаях работает при переменном давлении окружающей среды.

Теоретическая высотная характеристика ЖРДМТ с вытеснительной подачей топлива совпадает с характеристикой камеры двигателя.

Построим высотную характеристику ЖРДМТ с камерой фиксированной геометрии при принятых допущениях, используя полученные ранее зависимости (2.19) и (2.20) (рисунок 2.4).

При безотрывном течении рабочего тела в сопле высотная характеристика описывается уравнениями:

$$P = Ap_k - p_n F_a = M - F_a p_n, \quad (2.23)$$

$$I_y = B - C \frac{P_n}{p_\kappa} = I_{y,n} - N p_n, \quad (2.24)$$

где  $A, B, C, M$  и  $N$  – постоянные величины.

Из уравнений (2.23) и (2.24) видно, что с увеличением давления окружающей среды  $p_n$  тяга  $P$  и удельный импульс тяги  $I_y$  уменьшаются линейно от их значений в пустоте (см. рисунок 2.4).

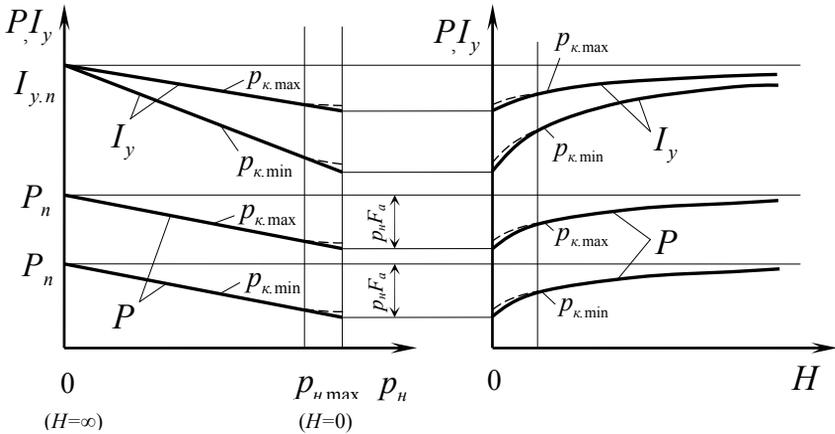


Рисунок 2.4 – Высотная характеристика ЖРДМТ:

- – безотрывное течение РТ в сопле;
- – отрывное течение

Каждому значению  $p_\kappa$  соответствует своя высотная характеристика (см. рисунок 2.4). При этом чем больше давление в камере сгорания, тем меньше относительно пустотного значения снижаются тяга и удельный импульс тяги двигателя с ростом давления окружающей среды  $p_n$ .

Увеличение площади выходного сечения сопла  $F_a$  при  $p_\kappa = \text{const}$  ведет к росту  $P_n, I_{y,n}$  и увеличению угла наклона ли-

нейных высотных характеристик  $P = f(p_n)$  и  $I_y = f(p_n)$  к оси абсцисс. При этом большему  $F_a$  соответствуют большие значения  $P_n, I_{y,n}$ .

ЖРДМТ с круглым сверхзвуковым соплом (соплом Лаваля) в полете при переменном давлении окружающей среды будет иметь самый высокий удельный импульс тяги в случае регулирования площади среза сопла  $F_a$  по определенному закону так, чтобы на любой высоте сопло работало на расчетном режиме.

Для построения характеристики ЖРДМТ по высоте полета  $H$  необходимо иметь зависимость атмосферного давления от высоты  $p_n = f(H)$ . Эту зависимость принимают по данным стандартной атмосферы ГОСТ 4401-81, ИСО 2533. Выдержки параметров стандартной атмосферы приведены в таблице 2.1.

**Таблица 2.1. Международная стандартная атмосфера**

$H$	км	0	0,5	2,0	5,0	7,5	10,0	15,0
$p_n$	Па	101325	95461,3	79501,4	54048,3	38299,7	26499,9	12111,8

$H$	км	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0
$p_n$	Па	5529,29	2549,21	1197,03	574,592	287,143	149,101	79,7787

Зависимость атмосферного давления от высоты  $p_n = f(H)$  нелинейная, поэтому и высотная характеристика  $P, I_y = f(H)$  будет нелинейной (см. рисунок 2.4).

При росте давления окружающей среды для данного  $p_k = \text{const}$  уменьшается отношение  $p_a/p_n$ , 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  $p_k$ .

Расчет высотной характеристики ЖРДМТ при отрыве потока в сопле может быть выполнен приближенно.

## 2.2 Динамические характеристики

*Динамическими характеристиками* ЖРДМТ называют зависимости его выходных параметров от внешних и внутренних параметров, определяющих работу двигателя на неустановившихся режимах, таких как запуск, останов, импульсный.

### 2.2.1 Параметры ЖРДМТ в импульсном режиме

Основной отличительной особенностью ЖРДМТ является их способность работать в непрерывном и импульсном режимах.

В импульсном режиме работы, т.е. режиме многократных кратковременных включений, выходные параметры двигателя, такие как импульс тяги, удельный импульс и др. зависят в общем случае от времени включения двигателя, порядкового номера импульса в серии и частоты включений. Рабочий процесс двигателя носит ярко выраженный нестационарный характер.

Использование выходных параметров, пригодных для установившегося режима, таких как тяга, удельный импульс тяги, массовый расход топлива, давление в камере сгорания, теряет смысл. Появляется необходимость введения подобных выходных интегральных характеристик, оценивающих работу двигателя в импульсном режиме. Важно также знание характерных времен, за которые эти скоротечные процессы в ЖРДМТ совершаются.

Рассмотрим основные динамические параметры ЖРДМТ. Для этого на рисунке 2.5 изобразим диаграмму работы ЖРДМТ в импульсном режиме.

На диаграмме показаны переходные процессы, имеющие место в импульсном режиме работы ЖРДМТ, и времена их характеризующие. Эти интервалы времени и представляют собой временные динамические параметры ЖРДМТ. Показано изменение во времени  $\tau$  силы тока  $i$ , напряжения  $u$  на обмотках электромагнитных клапанов двигателя, давлений в магистралях горючего и окислителя на входе в двигатель  $p_{вхг}$  и  $p_{вхок}$ , тяги  $P$  или давления в камере сгора-

ния  $p_k$ . Изменение тяги или давления в камере сгорания представлено в относительном к непрерывному режиму работы виде, т.е.  $P/P_n$  или  $p_k/p_{k,n}$ .

Время включения ЖРДМТ  $\tau_{вк}$  представляет собой интервал времени от момента подачи напряжения на электромагнитные топливные клапаны до момента его снятия, т.е. это длительность управляющего электрического сигнала на включение двигателя (см. рисунок 2.5).

Пауза между отдельными включениями  $\tau_n$  – интервал времени от момента снятия напряжения с электромагнитных топливных клапанов до момента подачи следующего напряжения, т.е. интервал между следующими друг за другом управляющими сигналами.

Период включения двигателя

$$T = \tau_{вк} + \tau_n. \quad (2.25,а)$$

Отношение паузы к сумме времени включения и паузы называется скважностью включения ЖРДМТ:

$$s = \frac{\tau_n}{\tau_{вк} + \tau_n}. \quad (2.25,б)$$

Коэффициент заполнения импульсного режима ЖРДМТ

$$k_з = \frac{\tau_{вк}}{\tau_{вк} + \tau_n}. \quad (2.26)$$

Частота включения двигателя

$$f = \frac{1}{T} = \frac{s}{\tau_n}. \quad (2.27)$$

Быстродействие ЖРДМТ оценивается временами его выхода на режим и останова.

Время выхода ЖРДМТ на режим  $\tau_{0,9}$  – это интервал времени от момента подачи напряжения на электромагнитные топливные клапаны до момента, когда тяга или давление в камере сгорания достигают значения, равного 0,9 значения тяги  $P_n$  или давления в камере сгорания  $p_{k,n}$  на непрерывном режиме (см. рисунок 2.5).

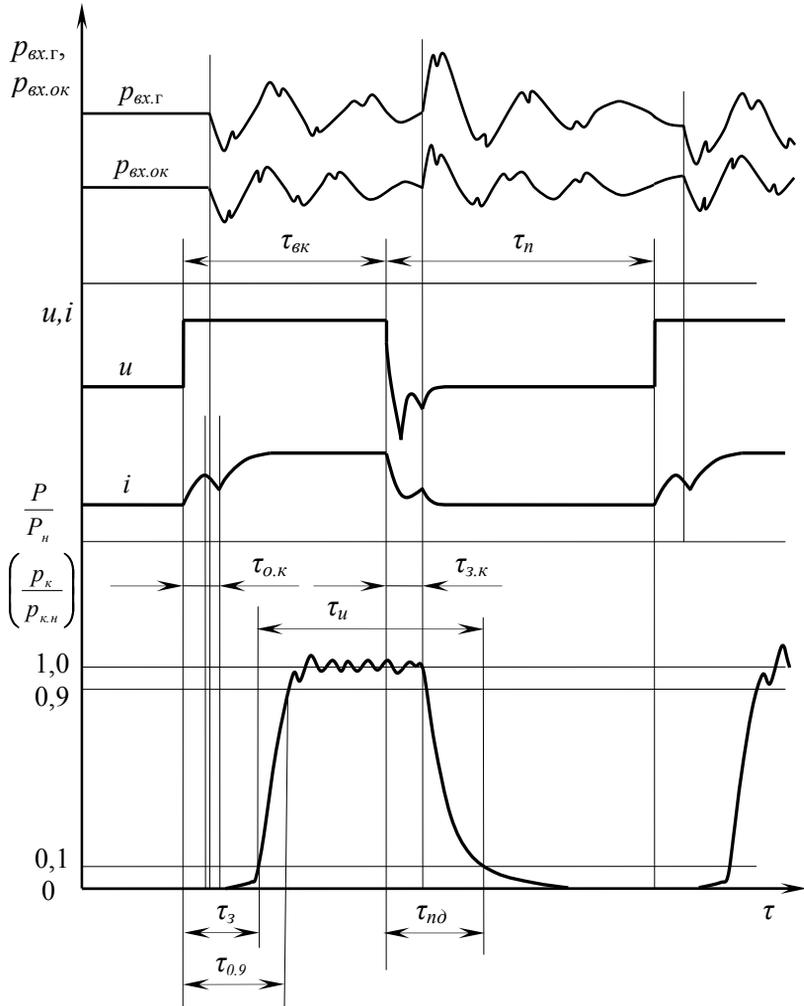


Рисунок 2.5 – Диаграмма работы ЖРДМТ в импульсном режиме

Время задержки тяги ЖРДМТ  $\tau_3$  – это интервал времени от момента подачи напряжения на электрические топливные клапаны до момента, когда тяга или давление в камере сгорания достигают зна-

чения, равного 0,1 значения тяги  $P_n$  или давления в камере сгорания  $P_{к.н}$  на непрерывном режиме (см. рисунок 2.5).

Время выхода двигателя на режим  $\tau_{0,9}$  и время задержки тяги ЖРДМТ  $\tau_z$  определяются быстродействием электроклапанов окислителя и горючего, т.е. временами их открытия  $\tau_{ок}$ , временем заполнения компонентами заклапанных объемов  $\tau_k$  и задержкой воспламенения топлива в ЖРДМТ  $\tau_{з.в}$ .

Время открытия электромагнитного клапана окислителя или горючего ( $\tau_{ок.ок}$  и  $\tau_{ок.г}$  соответственно) – это интервал времени от момента подачи напряжения на клапан до момента его полного открытия.

Время заполнения компонентами заклапанных объемов  $\tau_k$  – это интервал времени от момента начала открытия первого из открывающихся клапанов до момента начала поступления второго компонента топлива в камеру сгорания ЖРДМТ.

Задержка воспламенения топлива в ЖРДМТ  $\tau_{з.в}$  – это интервал времени от момента начала поступления второго компонента топлива в камеру сгорания ЖРДМТ до момента воспламенения топлива, вызывающего резкий рост давления в камере сгорания. Если компоненты топлива самовоспламеняющиеся, то это задержка самовоспламенения топлива в ЖРДМТ.

С началом открытия топливных клапанов окислитель и горючее начинают поступать в заклапанные полости, заполняя их. Заклапанные полости в ЖРДМТ – это объемы магистралей компонентов от топливных клапанов до выхода из форсунок. После заполнения заклапанных полостей окислитель и горючее начинают подаваться в камеру сгорания. До этого момента времени  $\tau_k$ , связанного с началом появления топлива в камере, импульс тяги двигателем не создается. Пренебрежимо мала величина создаваемой двигателем тяги и в следующий период, обусловленный задержкой воспламенения топлива в ЖРДМТ  $\tau_{з.в}$ , что объясняется задержкой воспламенения компонентов в камере сгорания в условиях практически нулевого начального значения давления. При низком давлении в камере сго-

рания в момент запуска двигателя величина  $\tau_{з.в}$  возрастает из-за существенного снижения химической активности компонентов топлива.

Время останова ЖРДМТ  $\tau_{н.д}$  – это интервал времени от момента снятия напряжения с электромагнитных топливных клапанов до момента, когда тяга или давление в камере сгорания снизятся до значения, равного 0,1 значения тяги  $P_n$  или давления в камере сгорания  $P_{к.н}$  на непрерывном режиме. Это время характеризует последствие ЖРДМТ и обозначается  $\tau_{н.д}$ .

Время останова ЖРДМТ определяется быстродействием электроклапанов окислителя и горючего, т.е. временами их закрытия  $\tau_{з.к}$ , временем догорания топлива, поступающего из заклапанных объемов, и временем опорожнения камеры сгорания от продуктов сгорания.

Время закрытия электромагнитного клапана окислителя или горючего ( $\tau_{з.к.ок}$  и  $\tau_{з.к.г}$  соответственно) – это интервал времени от момента снятия напряжения с клапана до момента его полного закрытия.

Сумма времен включения и останова представляет собой время работы ЖРДМТ  $\tau_p$ :

$$\tau_p = \tau_{вк} + \tau_{н.д}. \quad (2.28)$$

В целом быстродействие двигателя зависит от скорости открытия и закрытия топливных электромагнитных клапанов, величины задержки воспламенения или самовоспламенения топлива, объема заклапанных полостей, объема его камеры сгорания.

В импульсном режиме работы результат работы двигателя определяется не тягой, а импульсом тяги, создаваемым ЖРДМТ за время работы при одном коротком включении двигателя:

$$I_u = \int_0^{\tau_p} P d\tau = \int_0^{\tau_{вк} + \tau_{н.д}} P d\tau. \quad (2.29)$$

Используется импульс тяги в пустоте  $I_{н.у}$ , т.к. ЖРДМТ работают, как правило, в космическом пространстве. Определяется он по значению тяги в пустоте  $P_n$ .

Удельные параметры, оценивающие эффективность работы двигателя в импульсном режиме:

✓ Удельный импульс тяги ЖРДМТ в пустоте

$$I_{y.n.u} = \frac{\int_0^{\tau_{вк} + \tau_{н.д}} P_n d\tau}{\int_0^{\tau_{вк} + \tau_{н.д}} \dot{m}_{ок} d\tau + \int_0^{\tau_{вк} + \tau_{н.д}} \dot{m}_{г} d\tau} = \frac{\int_0^{\tau_p} P_n d\tau}{\int_0^{\tau_p} \dot{m} d\tau} = \frac{I_{n.u}}{m_u}, \quad (2.30)$$

где  $\dot{m}_{ок}$ ,  $\dot{m}_{г}$  – мгновенные массовые расходы окислителя и горючего в камеру соответственно;  $m_u$  – масса топлива, выработанного за одно включение двигателя.

✓ Расходный комплекс

$$\beta_u = \frac{F_M \int_0^{\tau_{вк} + \tau_{н.д}} p_K d\tau}{\int_0^{\tau_{вк} + \tau_{н.д}} \dot{m}_{ок} d\tau + \int_0^{\tau_{вк} + \tau_{н.д}} \dot{m}_{г} d\tau} = \frac{F_M \int_0^{\tau_p} p_K d\tau}{m_u}, \quad (2.31)$$

где  $F_M$  – площадь минимального сечения сопла;  $p_K$  – давление рабочего тела на входе в камеру сгорания.

Коэффициент камеры сгорания и полноты удельного импульса связаны между собой следующим образом:

$$\varphi_{к.и} = \mu_c \sigma_f \sigma_c \varphi_{\beta.u}, \quad (2.32)$$

где  $\sigma_f$  и  $\sigma_c$  – коэффициенты восстановления полного давления в камере сгорания и в докритической части сопла соответственно.

✓ Характеристическая скорость

$$C_{*u} = \frac{\mu_c F_M \int_0^{\tau_{вк} + \tau_{н.д}} p_{o.c} d\tau}{\int_0^{\tau_{вк} + \tau_{н.д}} \dot{m}_{ок} d\tau + \int_0^{\tau_{вк} + \tau_{н.д}} \dot{m}_{г} d\tau} = \frac{\mu_c F_M \int_0^{\tau_p} p_{o.c} d\tau}{m_u}, \quad (2.33)$$

где  $\mu_c$  – коэффициент расхода сопла;  $p_{oc}$  – давление торможения на выходе из камеры сгорания.

✓ Тяговый комплекс в пустоте

$$K_{P.n.u} = \frac{\int_0^{\tau_{ок} + \tau_{н.о}} P_n d\tau}{F_M \int_0^{\tau_{ок} + \tau_{н.о}} p_k d\tau} = \frac{I_{y.n.u}}{\beta_u}. \quad (2.34)$$

✓ Коэффициент тяги в пустоте

$$K_{T.n.u} = \frac{\int_0^{\tau_{ок} + \tau_{н.о}} P_n d\tau}{\mu_c F_M \int_0^{\tau_{ок} + \tau_{н.о}} p_{oc} d\tau} = \frac{I_{y.n.u}}{c_{*u}}. \quad (2.35)$$

Для оценки совершенства рабочих процессов в ЖРДМТ, камере сгорания и сопле в импульсном режиме работы вводятся следующие коэффициенты:

➤ Коэффициент камеры сгорания  $\varphi_{к.и} = \frac{c_{*u}}{c_{*ио}}$ , (2.36)

где  $c_{*ио}$  – идеальная характеристическая скорость, полученная термодинамическим расчетом идеального ЖРД.

➤ Коэффициент полноты расходного комплекса

$$\varphi_{\beta.u} = \frac{\beta_u}{\beta_{ио}}, \quad (2.37)$$

где  $\beta_{ио}$  – идеальный расходный комплекс, полученный термодинамическим расчетом идеального ЖРД.

➤ Коэффициент сопла  $\varphi_{с.и} = \frac{K_{T.n.u}}{K_{T.n.ио}}$ , (2.38)

где  $K_{T.n.ио}$  – идеальный коэффициент тяги сопла в пустоте, полученный термодинамическим расчетом идеального ЖРД.

- Коэффициент удельного импульса, учитывающий все потери энергии в ЖРДМТ в импульсном режиме работы,

$$\varphi_{I,u} = \frac{I_{y.n.u}}{I_{y.n.ид}} = \varphi_{к.и} \varphi_{с.и}, \quad (2.39)$$

где  $I_{y.n.ид}$  – идеальный удельный импульс тяги в пустоте, полученный термодинамическим расчетом.

## 2.2.2 Характеристика по длительности включения ЖРДМТ

*Характеристика по длительности включения* – это зависимость импульса тяги, удельного импульса тяги и других выходных параметров ЖРДМТ в импульсном режиме работы от длительности включения  $\tau_{вк}$  при неизменном режиме работы двигателя, т.е. при постоянном давлении в камере сгорания  $p_{к.н}$  и соотношении компонентов топлива  $K_m$  на непрерывном режиме работы. В формализованном виде это запишется:

$$I_u, I_{y.u} = f(\tau_{вк}) \text{ при } p_{к.н}, K_{m.n} = \text{const}. \quad (2.40)$$

Эта характеристика необходима для системы управления КА. Она позволяет значительно экономить топливо, расходуемое системой управления КА на ориентацию аппарата. Обобщенная экспериментальная характеристика по длительности включения конкретных ЖРДМТ, используемых в системе управления КА, заносится в постоянную память бортового компьютера. Она используется системой управления при выработке требуемой величины управляющего импульса силы или момента, что позволяет экономить топливо на борту КА.

Время включения ЖРДМТ  $\tau_{вк}$  определяет величину создаваемого импульса тяги  $I_u$ , массу топлива, израсходованного за одно включение,  $m_u$ , а значит удельный импульс тяги в импульсном режиме  $I_{y.u}$ , определяющий экономичность работы двигателя.

Экспериментальная характеристика  $I_{y.u} = f(\tau_{вк})$  используется для аттестации двигателя, прошедшего доводку и принятого к экс-

плуатации в системе управления положением КА в пространстве. Иногда эту характеристику строят не от времени включения  $\tau_{вк}$ , а от времени открытого состояния топливных клапанов  $\tau_{кл}$ . Эти времена однозначно связаны между собой. Характеристику  $I_{y.u} = f(\tau_{кл})$  удобнее использовать для анализа рабочего процесса ЖРДМТ на этапе экспериментального совершенствования двигателя в процессе его доводки.

Для оценки степени снижения экономичности двигателя при переходе от непрерывных к импульсным режимам работы применяется относительный удельный импульс тяги  $\bar{I}_{y.u} = I_{y.u} / I_{y.n}$ , значения которого существенно меньше единицы. Анализ показывает, что основной причиной низких значений  $I_{y.u}$  является наличие в ЖРДМТ заклапанных полостей и задержки воспламенения топливной смеси в камере сгорания  $\tau_{з.в}$ .

Проведем оценку влияния  $\tau_{з.в}$  на экономичность ЖРДМТ. Она может быть выполнена в предположении постоянства давлений обоих компонентов топлива на входе в двигатель на протяжении всего времени включения ЖРДМТ  $\tau_{вк}$ .

Используем уравнение массового расхода жидкого компонента через форсунки смесительной головки

$$\dot{m}_\phi = \mu_\phi F_\phi \sqrt{2\rho \Delta p_\phi}, \quad (2.41)$$

где  $\Delta p_\phi$  – перепад давления на форсунках окислителя или горючего.

Для работы двигателя на непрерывном режиме можно записать:

$$\dot{m}_\phi = \mu_\phi F_\phi \sqrt{2\rho(p_{ex} - p_{к.н})}, \quad (2.42)$$

где  $p_{ex}$  и  $p_{к.н}$  – абсолютные давления компонентов топлива на входе в двигатель и в камере сгорания на непрерывном режиме соответственно.

Для понимания физической картины рабочего процесса изобразим на рисунке 2.6 диаграмму работы ЖРДМТ в режиме короткого единичного включения при различных длительностях включения двигателя  $\tau_{вк}$ .

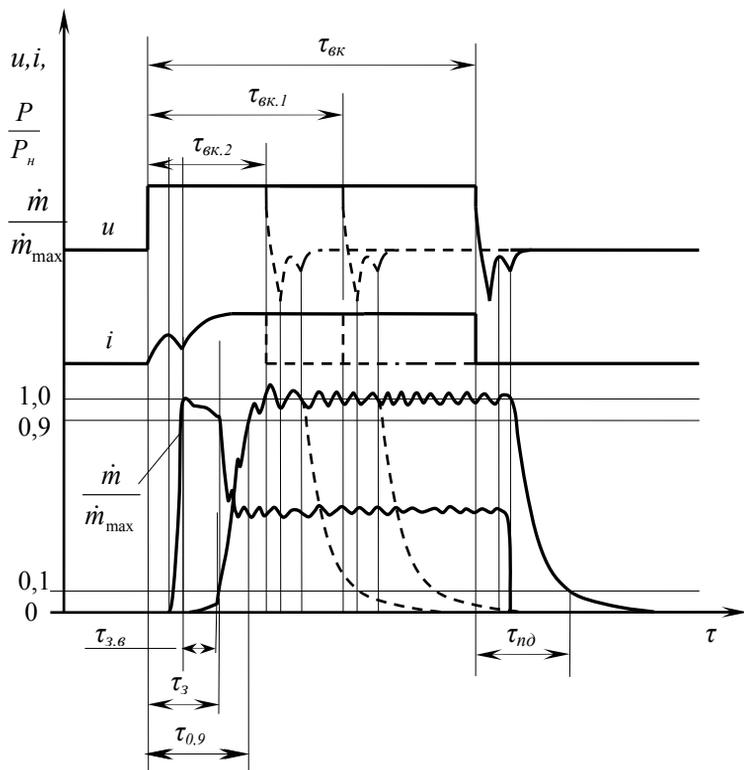


Рисунок 2.6 – Диаграмма работы ЖРДМТ при коротком единичном включении

На участке времени задержки воспламенения топливной смеси в камере сгорания  $\tau_{3.6}$  давление в камере сгорания двигателя  $p_k$  близко к нулю, поэтому можно записать:

$$\dot{m}_{3.6} = \mu_\phi F_\phi \sqrt{2\rho p_{ex}}. \quad (2.43)$$

Полагая коэффициент расхода форсунок горючего и окислителя  $\mu_\phi$  неизменным, т.е. не зависящим от перепада давления на них, можно получить уравнение, описывающее изменение мгновенного массового расхода топлива на участке времени задержки воспламенения

топливной смеси в камере сгорания  $\tau_{3.6}$ , а значит на участках времени задержки тяги ЖРДМТ  $\tau_3$  и времени выхода двигателя на режим  $\tau_{0,9}$ :

$$\dot{m}_{\tau_{0,9}} = \dot{m} \sqrt{\frac{P_{ex}}{P_{ex} - P_{к.н}}}. \quad (2.44)$$

Видно, что массовый расход топлива на участке выхода двигателя на режим  $\tau_{0,9}$  существенно больше, чем на непрерывной работе двигателя. Масса топлива, поступившего в камеру на участке выхода двигателя на режим  $\tau_{0,9}$ , практически не создает импульса тяги. Оно тратится неэффективно. Относительная массовая доля топлива, не пошедшего на создание импульса тяги, от общей массы топлива, выработанной за короткое включение двигателя (за импульс), запишется:

$$\bar{m}_{\tau_{0,9}} = \frac{m_{\tau_{0,9}}}{m_u} = \frac{\int_0^{\tau_{0,9}} \dot{m}_{ок} d\tau + \int_0^{\tau_{0,9}} \dot{m}_r d\tau}{\int_0^{\tau_{вк} + \tau_{н.д}} \dot{m}_{ок} d\tau + \int_0^{\tau_{вк} + \tau_{н.д}} \dot{m}_r d\tau}. \quad (2.45)$$

Из (2.45) следует, что с уменьшением времени включения ЖРДМТ  $\tau_{вк}$  при неизменном числителе значение знаменателя снижается, приближаясь к значению числителя ( $\bar{m}_{\tau_{0,9}} \rightarrow 1$ ), т.е. относительная массовая доля топлива, не пошедшего на создание импульса тяги, возрастает (см. рисунок 2.6).

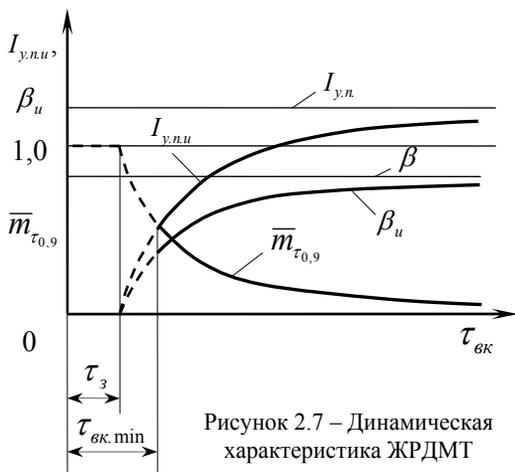
Удельный импульс тяги ЖРДМТ в пустоте при коротком единичном включении

$$I_{у.п.л.} = \frac{\int_0^{\tau_{вк} + \tau_{н.д}} P_n d\tau}{\int_0^{\tau_{вк} + \tau_{н.д}} \dot{m}_{ок} d\tau + \int_0^{\tau_{вк} + \tau_{н.д}} \dot{m}_r d\tau} = \frac{\int_0^{\tau_{вк} + \tau_{н.д}} P_n d\tau}{\int_0^{\tau_{вк} + \tau_{н.д}} \dot{m} d\tau} = \frac{I_{н.л.}}{m_u}, \quad (2.46)$$

где  $\dot{m}_{ок}$ ,  $\dot{m}_r$  и  $\dot{m}$  – мгновенные массовые расходы окислителя, горючего и топлива в камеру соответственно,  $m_u$  – масса топлива, выработанного за одно короткое включение двигателя.

Из (2.46) следует, что с уменьшением времени включения ЖРДМТ  $\tau_{вк}$  площадь под зависимостью  $P_n = f(\tau)$  снижается, а площадь под функцией  $\dot{m} = f(\tau)$  увеличивается, т.е. числитель падает, а знаменатель растет. Поэтому удельный импульс тяги ЖРДМТ в пустоте при коротком единичном включении  $I_{y.n.u}$  резко уменьшается. Это хорошо видно на диаграмме работы ЖРДМТ в режиме короткого единичного включения при различных длительностях включения двигателя  $\tau_{вк}$ , изображенной на рисунке 2.6.

Учитывая все сказанное, изобразим на рисунке 2.7 теоретическую динамическую характеристику ЖРДМТ по длительности включения, т.е. построим вид зависимостей  $I_{y.n.u}, \beta_u, \bar{m}_{\tau_{0,9}} = f(\tau_{вк})$ .



Начиная с минимальной длительности включения, существующей для любого конкретного ЖРДМТ  $\tau_{вк min}$ , удельный импульс тяги возрастает по экспоненциальной зависимости с увеличением длительности включения  $\tau_{вк}$ , асимптотически приближаясь к значению  $I_{y.n}$  на непрерывном режиме

работы. Это объясняется тем, что доля времен выхода двигателя на режим  $\tau_{0,9}$  и его останова  $\tau_{n,d}$ , где топливо, поступившее в камеру,

используется неэффективно для создания тяги и во время включения ЖРДМТ  $\tau_{вк}$  значительно снижается (см. рисунки 2.5 и 2.6).

При переходе от непрерывного режима к импульсному имеют место дополнительные, неучтенные при данном упрощенном анализе виды потерь энергии. Эти потери обусловлены нестационарностью рабочего процесса после запуска двигателя, интенсивным теплоотводом от продуктов сгорания в стенку камеры и окружающую среду, влиянием колебаний давления подачи топлива и другими факторами. Выявление и учет этих потерь проводится при детальном исследовании рабочего процесса ЖРДМТ.

При определении значений удельного импульса в импульсном режиме обычно не учитывается и часть импульса тяги, создаваемого двигателем после времени работы ЖРДМТ  $\tau_p = \tau_{вк} + \tau_{н.д}$  (см. рисунок 2.5), получаемого от выгорания и испарения топлива из заклепанных полостей после останова двигателя. Изучение импульса последствия двигателя является самостоятельной задачей, решение которой направлено на минимизацию величины импульса последствия.

На сегодняшний день расчетная динамическая характеристика ЖРДМТ по длительности включения для находящего в эксплуатации и вновь проектируемого двигателя получена быть не может. Это объясняется отсутствием достоверных математических моделей, описывающих рабочий процесс ЖРДМТ в импульсном режиме. Однако она может быть построена с использованием статистических экспериментальных данных по прототипам схем смесеобразования с целью выбора исходных режимных и конструктивных параметров двигателя.

### 2.2.3 Характеристика по частоте включения ЖРДМТ

*Характеристика по частоте включения* – это зависимость импульса тяги, удельного импульса тяги и других выходных параметров ЖРДМТ в импульсном режиме работы от частоты следования включений двигателя  $f$  при постоянной длительности включения  $\tau_{вк}$  и неизменном режиме работы двигателя, т.е. при постоянном

давлении в камере сгорания  $p_{к.н}$  и массовом соотношении компонентов топлива  $K_{т.н}$  на непрерывном режиме работы. В формализованном виде это запишется:

$$I_u, I_{y.u} = f(f) \text{ при } p_{к.н}, K_{т.н}, \tau_{вк} = \text{const}. \quad (2.47)$$

Характеристика по частоте включения ЖРДМТ используется системой управления КА для уменьшения расхода топлива, затрачиваемого на управление аппаратом.

Теоретическая характеристика двухкомпонентного ЖРДМТ по частоте включения при постоянной длительности включения приведена на рисунке 2.8.

Удельный импульс тяги в импульсном режиме работы  $I_{y.u}$  для первого импульса в серии ( $n=1$ ) не зависит от частоты включений ЖРДМТ при неизменном времени включения, т.к. для них реализуется режим одиночных включений. Для последующих импульсов в серии  $I_{y.u}$  увеличивается с возрастанием частоты включений ЖРДМТ, причем тем быстрее, чем больше порядковый номер импульса в серии.

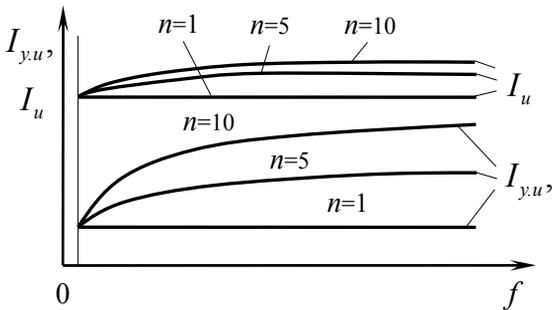


Рисунок 2. – Динамическая характеристика ЖРДМТ по частоте включения  $I_{y.u}, I_u = f(f)$ :  $\tau_{вк} = \text{const}$ ;  $n$  – порядковый номер импульса в серии

пульса в серии.

С увеличением длительности включения  $\tau_{вк}$  скорость возрастания удельного импульса тяги для всех включений, начиная со второго, возрастает, что объясняется большей передачей тепловой энергии от предыдущего включения к последующему в серии

включений двигателя с одной частотой.

До определенной частоты при заданной длительности включения ЖРДМТ удельный импульс тяги не зависит от частоты включения

двигателя для любого порядкового номера следования импульса в серии, т.к. для всех импульсов реализуется режим одиночных включений, когда за время паузы между соседними включениями двигатель успевает приходиться в исходное состояние.

Приведенная характеристика характерна для импульсного режима работы ЖРДМТ со связанными импульсами. В случае перекрывающихся импульсов динамическая характеристика по частоте включения ЖРДМТ имеет максимальную скорость нарастания.

#### 2.2.4 Характеристика по порядковому номеру следования включения двигателя в серии

*Характеристика ЖРДМТ по порядковому номеру следования включения в серии* – это зависимость импульса тяги, удельного импульса тяги и других выходных параметров двигателя в импульсном режиме работы от порядкового номера следования включения ЖРДМТ  $n$  при постоянной длительности включения  $\tau_{вк}$ , частоте включения  $f$  и неизменном режиме работы двигателя, т.е. при постоянном давлении в камере сгорания  $p_{кн}$  и соотношении компонентов топлива  $K_{т.н}$  на непрерывном режиме работы. В формализованном виде это запишется:

$$I_u, I_{y.u} = f(n) \text{ при } p_{кн}, K_{т.н}, \tau_{вк}, f = \text{const}. \quad (2.48)$$

Обобщенная динамическая характеристика ЖРДМТ по порядковому номеру следования включения двигателя в серии используется системой управления КА для уменьшения расхода топлива, затрачиваемого на управление аппаратом.

Теоретические характеристики двухкомпонентного ЖРДМТ по порядковому номеру следования включения двигателя в серии при постоянном времени включения и трех разных частотах включений приведены на рисунке 2.9.

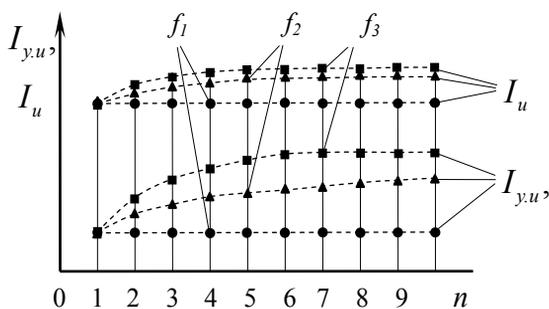


Рисунок 2.9 – Динамическая характеристика ЖРДМТ по порядковому номеру следования включения в серии:  $\tau_{\text{вк}} = \text{const}$ ,  $f_1 < f_2 < f_3$

Видно, что для первых включений в трех сериях из 10 включений ЖРДМТ с различной той и постоянным временем включения удельный импульс тяги остается постоянным. Это объясняется тем, что для них реализуется режим одиночных включений, когда за время паузы между сериями включений двигатель успевает приходиться в исходное тепловое состояние.

При постоянной длительности включения с уменьшением частоты включения характеристика ЖРДМТ по порядковому номеру следования включения в серии становится более пологой, что свидетельствует о меньшей связанности импульсов в серии включений.

При любом времени включения ЖРДМТ найдется такая частота включений, при которой для всех номеров включений в серии будет реализовываться режим одиночных включений. Удельный импульс тяги будет оставаться постоянным для всех номеров включений ЖРДМТ в серии (см. рисунок 2.9).

## 3 ИСПЫТАНИЯ ЖРДМТ

### 3.1 Виды испытаний и их классификация

Существуют классификации испытаний ЖРДМТ по различным признакам. Рассмотрим наиболее распространенные.

Все испытания ЖРДМТ в зависимости от этапа жизненного цикла двигателя, на котором проводятся испытания, делятся на три основные группы:

- *научно-исследовательские;*
- *опытно-конструкторские;*
- *эксплуатационные.*

Осуществить разработку нового, перспективного, конкурентоспособного на мировом рынке ЖРДМТ невозможно без проведения научно-исследовательских испытаний. Их основная цель – способствовать созданию научного задела в виде пакета «ноу-хау», необходимого для дальнейшего развития и совершенствования ЖРДМТ.

Научно-исследовательские испытания проводят в НИИ, лабораториях ОКБ и вузов.

Всегда, когда это допустимо, реальные дорогостоящие испытания ЖРДМТ следует заменять *модельными испытаниями*. Широко используются сейчас математические и информационные модели и специализированные программные комплексы.

Опытно-конструкторские испытания двигателей, их узлов и агрегатов проводят в процессе выполнения ОКР по разработке нового ЖРДМТ по мере возникающей необходимости. Этот комплекс испытаний включает в себя следующие этапы:

- 1) *исследовательских испытаний;*
- 2) *доводочных;*
- 3) *предварительных;*
- 4) *приемочных.*

Каждый из этапов имеет несколько видов испытаний. Необходимость данного вида испытаний, состав испытаний, последовательность проведения, объем устанавливает разработчик ЖРДМТ в соответствии с комплексной программой экспериментальной отработки (КПЭО) двигателя, составленной таким образом, чтобы заданные параметры, надежность и стоимость разрабатываемого

ЖРДМТ были обеспечены в минимальное время и с минимальными затратами средств. Это позволит двигателю быть конкурентоспособным на мировом рынке.

Все испытания в ходе выполнения ОКР проводятся только на реальных конструкциях разрабатываемых узлов и ЖРДМТ в целом.

Одна из возможных классификаций опытно-конструкторских испытаний ЖРДМТ приведена на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Классификация опытно-конструкторских испытаний ЖРДМТ

По испытываемой конструкции все опытно-конструкторские испытания можно разделить:

- на автономные испытания отдельных систем, узлов и агрегатов ЖРДМТ;
- на испытания ЖРДМТ в целом.

По наличию при испытаниях процесса горения или разложения топлива все испытания ЖРДМТ или их отдельных узлов агрегатов и систем подразделяются:

- на огневые;
- на холодные.

Применение в ЖРДМТ эффективных, высокотоксичных и агрессивных компонентов делает процесс испытания этих двигателей опасным и дорогостоящим.

Важным этапом опытно-конструкторских испытаний являются доводочные испытания. Их цель – доработка конструкции ЖРДМТ до соответствия его характеристик техническому заданию (ТЗ).

Доводочным испытаниям подвергаются как отдельные узлы, агрегаты, системы и элементы двигателя, так и ЖРДМТ в сборе.

Учитывая импульсный режим работы ЖРДМТ, исключительно важным являются испытания по проверке надежности запуска двигателя и его работоспособности в условиях космического пространства. Особенно это важно для ЖРДМТ, работающих на несамовоспламеняющихся компонентах топлива.

Объем доводочных испытаний свидетельствует о качестве проектных работ и квалификации проектировщиков. Качественно спроектированный двигатель имеет минимальный объем доводочных испытаний. Этому способствует использование инновационных технологий в проектировании ЖРДМТ.

К группе эксплуатационных относятся испытания, проводимые на заводе-изготовителе ЖРДМТ, и в ходе эксплуатации двигателей. В основном это холодные испытания отдельных систем, узлов и агрегатов, например, проверка камеры на герметичность или характеристик топливных электромагнитных клапанов.

Количество измеряемых параметров при серийных испытаниях значительно меньше, чем при опытно-конструкторских испытаниях ЖРДМТ.

После подготовки производства к серийному выпуску нового ЖРДМТ или к возобновлению производства ранее выпускаемого двигателя проводят *установочные испытания* (УИ). Их цель – показать, что серийные ЖРДМТ по своим характеристикам и надежности соответствуют ТЗ и эталонному ЖРДМТ, прошедшему межведомственные и государственные испытания. Проведение УИ необходимо, т.к. технологический процесс изготовления серийных

ЖРДМТ всегда отличается от процесса изготовления их в опытном производстве.

Основными видами испытаний для контроля качества серийных ЖРДМТ являются:

- *контрольно-технологические (КТИ);*
- *подтверждающие периодические (ППИ);*
- *контрольно-выборочные (КВИ).*

КТИ подвергается каждый изготовленный ЖРДМТ. Это огневые испытания, целью которых является контроль качества изготовления и сборки данного двигателя, проверка его работоспособности, соответствия его характеристик требованиям, имеющимся в конструкторской документации, и возможности предъявления этого ЖРДМТ в штатную эксплуатацию или дальнейшие испытания. Иногда ЖРДМТ после контрольно-технологических испытаний разбирают с целью дефектации отдельных узлов и деталей. Дефектация является дополнительным средством контроля скрытых и неразвившихся дефектов.

Подтверждающие периодические испытания проводятся с целью, контроля качества изготовления ЖРДМТ и проверки соответствия его параметров, характеристик и работоспособности требованиям, установленным в ТЗ. ППИ проводятся через определенный промежуток времени.

Контрольно-выборочные испытания проводятся с той же целью, что и ППИ, но им подвергают один или несколько ЖРДМТ из изготовленной партии.

Подтверждающие периодические и контрольно-выборочные испытания – это длительные испытания на ресурс или превышающее его время, когда изменяются режимы его работы во всем эксплуатационном диапазоне. Двигатели, прошедшие эти испытания подвергают разборке, дефектации, металлургическим исследованиям и другим видам контроля. Это позволяет установить их действительное техническое состояние. Только положительные результаты испытания позволяют отправлять ЖРДМТ заказчику.

В процессе серийного производства ЖРДМТ проводят испытания:

- *специальные периодические;*
- *типовые.*

Специальные периодические испытания проводятся для определения соответствия характеристик и гарантийных запасов работоспособности ЖРДМТ уровню, достигнутому при завершении ОКР, контроля стабильности технологического процесса.

Типовые испытания проводят для выявления влияния различных технологических и конструктивных мероприятий на характеристики и работоспособность ЖРДМТ, находящегося в серийном производстве.

Для ЖРДМТ многократного использования для контроля технического состояния и подготовки к очередному полету предусматривают проведение испытаний двух типов:

- *межполетные контрольно-технологические (МКТИ);*
- *межполетные подтверждающие (МПИ).*

МКТИ подвергается все ЖРДМТ после полета и выполнения на них необходимых восстановительных работ. Испытания должны дать информацию о техническом состоянии ЖРДМТ, позволяющую сделать заключение о его полном соответствии технической документации.

На МПИ отбирают один из партии ранее эксплуатируемых и прошедших межполетные контрольно-технологические испытания ЖРДМТ. Этот двигатель подвергают испытаниям при гарантийной наработке. При успешном завершении МПИ дают разрешение на очередное использование ЖРДМТ данной партии по прямому назначению.

### **3.2 Стенды для испытаний ЖРДМТ**

Испытания ЖРДМТ проводятся на специальных стендах, входящих в состав испытательного комплекса или испытательной станции. Стенды предназначены для исследования рабочего процесса, отработки конструкции двигателей, определения и контроля их основных параметров и характеристик, проверки надежности.

В испытательный комплекс ЖРДМТ должны входить следующие стенды:

- ✓ *для холодных испытаний;*
- ✓ *для огневых испытаний.*

На стендах для холодных испытаний ЖРДМТ проводят гидравлические проливки форсунок, смесительных головок и топливных клапанов, настройку двигателя на заданные расходы компонентов, контроль герметичности и прочности его элементов.

На огневых стендах проводят испытания ЖРДМТ при горении или разложении топлива. Проверяется работоспособность ЖРДМТ, определяются действительные параметры и характеристики двигателя на земле и в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным, оценивается надежность работы двигателя.

ЖРДМТ предназначены для работы в системах управления космическими аппаратами, поэтому их испытания должны проводиться в условиях, максимально приближенных к условиям космического пространства.

Огневые стенды для испытаний ЖРДМТ подразделяют:

- ✓ *на наземные;*
- ✓ *высотные.*

На наземных стендах проводят испытания ЖРДМТ в непрерывных режимах для оценки работоспособности двигателя, измерения действительных параметров двигателя в земных условиях, оценки теплового состояния элементов конструкции и надежности, доводки двигателя, отработки различных конструкций ЖРДМТ.

На высотных стендах определяются действительные выходные и удельные параметры, а также характеристики ЖРДМТ в непрерывных и импульсных режимах при условиях, максимально приближенных к условиям космического пространства. В первую очередь имитируется низкое давление окружающей среды. Для этого высотные стенды имеют вакуумные камеры (барокамеры), где располагается испытуемый объект и с помощью вакуумной системы стенда создается низкое давление.

Вакуумная система высотного стенда должна создавать такое давление в барокамере, чтобы в течение всего времени работы ЖРДМТ обеспечивалось безотрывное течение газа в сопле. При исследовании рабочего процесса ЖРДМТ в период запуска и некоторых других стадиях, измерения плотности тепловых потоков, воздействующих на элементы конструкции двигателя, требуется создание в вакуумной камере более низкого давления перед запуском двигателя, а иногда и в процессе его огневой работы.

Все огневые высотные стенды по способу обеспечения низкого давления в барокамере делятся:

- *на расходные;*
- *нерасходные.*

Расходный высотный стенд обеспечивает требуемое низкое давление в барокамере как перед запуском ЖРДМТ, так и в процессе его работы. Вакуумная система расходных стендов осуществляет непрерывную откачку продуктов сгорания из барокамеры при требуемом значении давления в ней.

Нерасходный стенд не обеспечивает непрерывную откачку продуктов сгорания из барокамеры при работающем ЖРДМТ. Требуемое низкое давление создается в барокамере лишь перед запуском двигателя.

Расходные и нерасходные стенды могут иметь систему замораживания продуктов сгорания с помощью криогенных вакуумных панелей-конденсаторов.

Время испытания ЖРДМТ на нерасходном стенде определяется объемом барокамеры, поверхностью замораживающих криогенных панелей и тягой исследуемого ЖРДМТ, так как в вакуумной камере происходит накопление продуктов сгорания или частично незамороженных на панелях-конденсаторах веществ, и давление в барокамере по времени работы двигателя увеличивается. Поэтому нерасходный стенд должен иметь такой минимальный объем барокамеры, который бы обеспечивал время работы ЖРДМТ в непрерывном режиме не менее одной секунды с перерасширением рабочего тела в сопле, но без входа внутрь сопла скачков уплотнения. Это время позволяет измерить тягу ЖРДМТ и расходы компонентов топлива, а значит определить действительные удельные параметры двигателя. Для исследования теплового состояния ЖРДМТ требуется огневая работа двигателя в вакуумной камере при достаточно низком давлении более длительный период (более 30-50 с).

В общем случае современный высотный огневой стенд для испытаний ЖРДМТ должен включать следующие системы:

- вакуумную;
- топливную;
- измерительную;
- управления агрегатами, системами стенда и ЖРДМТ;
- термостатирования ЖРДМТ и компонентов топлива;

- автоматизации испытаний;
- электрическую;
- вентиляции;
- пневматическую;
- гидравлическую;
- нейтрализации компонентов, продуктов сгорания и сточных вод;
- противопожарную;
- безопасности испытаний, контроля и сигнализации.

Системы вакуумирования огневых стендов отличаются большим разнообразием. В систему вакуумирования входят, как правило, несколько групп механических насосов, в том числе форвакуумные насосы для создания начального вакуума и основные насосы, обеспечивающие необходимое давление в барокамере. Для создания более низкого давления в вакуумной камере используются паромасляные молекулярные вакуумные насосы. Количество насосов определяется их производительностью. Насосы соединяются между собой и с барокамерой посредством вакуумпровода, в котором имеются вакуумные затворы и криогенные панели, охлаждаемые жидким азотом, предназначенные для поддержания низкого давления в вакуумной камере и окончательной очистки поступающих в вакуумные насосы газов. При необходимости выход рабочего тела из вакуумных насосов производится в устройство для дожигания продуктов неполного сгорания топлива.

Огневые стенды испытаний ЖРДМТ имеют вытеснительные системы подачи топлива. Топливные системы состоят из баков для хранения компонентов топлива, магистралей подвода компонентов в двигатель, устройств наддува баков требуемым давлением вытеснения. В топливных и пневматических магистралях системы там, где это необходимо, устанавливают запорные вентили, пневмогидроклапаны, электрогидроклапаны, электропневмоклапаны и обратные клапаны.

Система вентиляции огневых стендов состоит из двух независимых видов вентиляции: приточной и вытяжной. Приточная вентиляция обеспечивает подачу свежего воздуха в кабину управления (пультовую), вытяжная – удаление воздуха из бокса. Так создается требуемый перепад давления между кабиной управления и боксом, чтобы пары токсичных компонентов топлива и продукты сгорания

не проникали из бокса в кабину управления. Система вентиляции должна обеспечить требуемую кратность обмена воздуха в кабине управления и боксе.

Измерительная система огневого стенда должна обеспечивать измерение основных параметров ЖРДМТ в непрерывном и импульсном режимах работы с погрешностями, не превышающими заданные в техническом задании на проводимые испытания. Основным для ЖРДМТ является импульсный режим работы, когда минимальное время включения двигателя может составлять 0,030 с. Частота следования включений может достигать до 10...20 Гц. Для измерения быстропеременных по времени параметров ЖРДМТ, таких как тяга двигателя, давление в камере сгорания, мгновенные расходы компонентов топлива и др., требуются измерительные устройства с высокими частотными характеристиками (малой постоянной времени, большой собственной частотой колебаний).

Система термостатирования ЖРДМТ и компонентов топлива необходима для получения экспериментальных параметров и характеристик двигателя при требуемых температурах из всего эксплуатационного температурного диапазона. Она нагревает или охлаждает двигатель и компоненты топлива до заданной температуры и поддерживает её постоянной в течение времени испытаний ЖРДМТ.

Система нейтрализации компонентов, продуктов сгорания и сточных вод служит для обезвреживания паров токсичных компонентов топлива, продуктов их сгорания и воды, которую используют для душирования струи продуктов сгорания, обмывания наружных поверхностей баков, клапанов, уровнемеров и т.п.

В системах стенда имеются агрегаты с ручным и дистанционным управлением. Агрегаты с ручным управлением используют при подготовке систем стенда к испытаниям. Агрегаты с дистанционным управлением можно включать вручную, индивидуально или отдельными группами, а также автоматически от системы автоматизации испытаний.

Рассмотрим примеры существующих стендов для холодных и огневых испытаний ЖРДМТ, их систем и агрегатов [9, 10, 22].

### 3.2.1. Стенд для холодных испытаний ЖРДМТ

Схема стенда для холодных испытаний ЖРДМТ представлена на рисунке 3.2 [22]. Стенд включает в себя проливочную установку 1, вытяжной шкаф 2, термовакуумные камеры 7, пневматический распределительный пульт 4 с подачей различных сжатых газов, технологическое оборудование со столами для проведения работ по подготовке к холодным испытаниям ЖРДМТ и его узлов, приточно-вытяжную вентиляцию 9.

Этот стенд позволяет проводить следующие виды холодных испытаний двигателя:

- определять действительные расходные характеристики форсунок или смесительной головки, т.е. зависимости массовых расходов компонентов топлива через форсунку или смесительную головку от перепада давления на них;

- настраивать ЖРДМТ на заданные

номинальные расходы окислителя и горючего;

- определять размеры факела распыла на выходе из форсунки или смесительной головки ЖРДМТ;

- определять распределение расходонапряженности в факеле распыла форсунки и в поперечном сечении камеры сгорания на выходе из смесительной головки ЖРДМТ с помощью специальных ловушек;

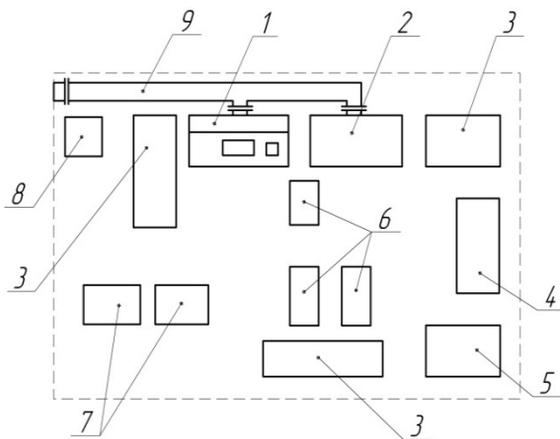


Рисунок 3.2 – Компоновочная схема стенда для холодных испытаний ЖРДМТ:

1 – проливочная установка; 2 – вытяжной шкаф;  
3 – стеллажи; 4 – пневматический распределительный пульт; 5 – сверлильный станок; 6 – технологические столы; 7 – термовакуумные камеры; 8 – мойка; 9 – приточно-вытяжная вентиляция

- измерять в модельных условиях времена срабатывания электромагнитных клапанов окислителя и горючего ЖРДМТ;
- контролировать герметичность узлов и элементов ЖРДМТ;
- проверять на прочность ЖРДМТ, его узлы и элементы;
- проводить технологические операции по подготовке ЖРДМТ к огневым испытаниям и после проведения испытаний, связанные с нейтрализацией оставшихся в полостях двигателя токсичных компонентов топлива, промывкой, проливкой и продувкой полостей двигателя с последующей их просушкой в термовакуумной камере.

На рисунке 3.3 изображена пневмогидравлическая схема проливочной установки.

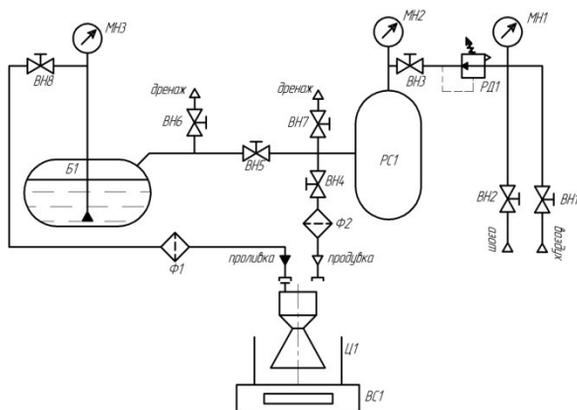


Рисунок 3.3 – Проливочная установка ЖРДМТ: ВН1...ВН8 – вентили; МН1...МН3 – манометры; РД1 – пневматический регулятор давления; РС1 – ресивер; Б1 – бак; Ф1 – гидравлический фильтр; Ф2 – пневматический фильтр; Ц1 – стеклянный цилиндр для сбора проходящей через двигатель жидкости; ВС1 – электронные весы

Для подачи реальных компонентов или моделируемой жидкости к испытываемому объекту используется вытеснительная система подачи. Рабочим телом вытеснения являются сжатый воздух или азот. В качестве моделируемых жидкостей при холодных испытаниях ЖРДМТ применяются дистиллированная вода, водно-спиртовой

раствор или другие жидкости. В состав проливочной установки входят бак с рабочей жидкостью, магистраль подвода жидкости из бака к форсунке или смесительной головке ЖРДМТ, система вытеснения жидкости из бака сжатым газом, запорная арматура, средства измерения давлений, массы прошедшей через форсунку или смесительную головку жидкости и времени.

### **3.2.2 Стенды для огневых испытаний ЖРДМТ**

Расходный высотный стенд для огневых испытаний ЖРДМТ обеспечивает требуемое низкое давление в барокамере перед запуском и в процессе работы ЖРДМТ. Вакуумная система расходных стендов осуществляет непрерывную откачку продуктов сгорания из барокамеры при требуемом значении давления в ней. На таких стендах проводят испытания ЖРДМТ с целью измерения тяги на непрерывном режиме работы. При этом давление, создаваемое в вакуумной камере, должно обеспечить полное расширение рабочего тела в сопле без входа внутрь сопла скачков уплотнения. Система непрерывного вакуумирования барокамеры такого расходного высотного огневого стенда приведена на рисунке 3.4 [10].

Необходимое давление на выходе из сопла ЖРДМТ 1 обеспечивается путем установки кормового сверхзвукового диффузора 2 и газоздушного двухступенчатого эжектора 3, 4. В первой ступени эжектора 3 в качестве рабочего тела используются продукты сгорания дополнительно подаваемой топливно-воздушной смеси с температурой (1000...1200) К. Наряду с эжекцией происходит дожигание продуктов неполного сгорания топлива ЖРДМТ. Во вторую ступень эжектора 4 подается холодный воздух и при этом температура продуктов сгорания понижается до 700 К.

По выходной трубе 5, оборудованной средствами шумоглушения, рабочее тело выводится в атмосферу. Охлаждение стенок кормового диффузора и камеры смещения первой ступени эжектора осуществляется водой, пропускаемой через тракт охлаждения этих элементов.

Рабочее тело первой ступени эжектора 3 образуется при сгорании в воздухе горючего, подаваемого через форсунки 6. К форсун-

кам воздух поступает из компрессора 8. Подача воздуха регулируется дроссельными заслонками 7.

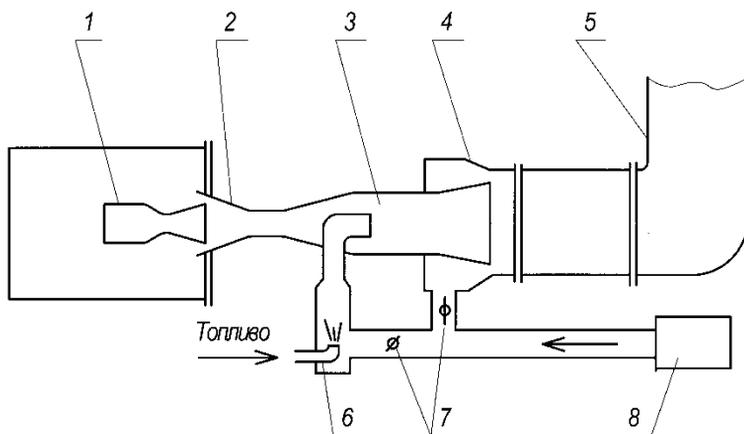


Рисунок 3.4 – Схема системы непрерывного вакуумирования:  
 1 – ЖРДМТ; 2 – диффузор; 3 – первая ступень эжектора; 4 – вторая ступень эжектора; 5 – труба выходная; 6 – форсунка; 7 – дроссельные заслонки; 8 – воздушный компрессор (вентилятор)

В ряде случаев при испытаниях ЖРДМТ важно обеспечить низкое начальное давление в вакуумной камере не только перед запуском двигателя, но и при проведении длительных испытаний в непрерывных и импульсных режимах. При этом систему вакуумирования делают комбинированной на базе механических насосов и эжекторов (воздушных, газовых или паровых в зависимости от конкретных условий). Структурная схема такого вакуумного стенда с пароэжектором и механическими насосами приведена на рисунке 3.5 [10].

В горизонтальной цилиндрической вакуумной камере 20, состоящей из неподвижного днища и откатной цилиндрической части, располагается на станке испытуемый ЖРДМТ 19. Станок закреплен на днище камеры.

Окислитель и горючее подаются к ЖРДМТ из баков, находящихся в герметичных шкафах 6 и 7, имеющих вытяжную вентиляцию. Снаружи днища вакуумной камеры расположены клапаны горючего 13 и окислителя 14.

Для обезвреживания сточных вод, содержащих токсичные вещества, служит система нейтрализации, в которой возможность взаимодействия компонентов топлива исключена путем раздельного их слива и нейтрализации. Для обезвреживания сточные воды с примесью горючего и его производных пропускают через соответствующие нейтрализующие вещества (сточные воды из топливного шкафа 6 – через вентиль 11, из вакуумной камеры – через задвижку 21, из конденсатных баков – через вентили 29, 30, 31). Сточные воды собираются и нейтрализуются в двух независимо работающих емкостях 25 и 26. При проведении процесса нейтрализации в одной емкости вторая емкость служит сборником сточных вод. После окончания очистки сточной воды в емкостях данная вода сливается из емкостей соответственно через вентили 32 и 33. Промывочная вода из шкафа 7 окислителя через вентиль 12 поступает в фильтр 27, заполненный нейтрализующим веществом. Нейтрализованная вода сливается через вентиль 34.

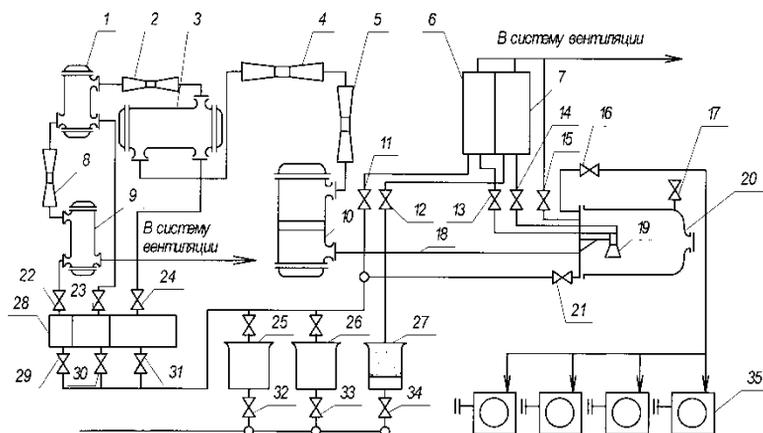


Рисунок 3.5 – Структурная схема вакуумного стенда с парозжектором и механическими насосами: 1,3,9 – конденсаторы кожухотрубчатые; 2,4,5,8 – ступени парозжекторного насоса; 6,7 – шкафы горючего и окислителя; 10 – теплообменник; 11,12,17,29,30,31,32,33,34 – вентили; 13,14 – клапаны; 15 – задвижка; 16,22,23,24 – вентили вакуумные; 18 – вакуумпровод; 19 – ЖРДМТ; 20 – камера вакуумная; 21 – задвижка; 25,26 – емкости нейтрализационные; 27 – фильтр; 28 – бак конденсатный; 35 – насос механический

При наземных испытаниях вакуумный вентиль 17 открыт, а весь воздухообмен в боксе идет через вакуумную камеру. При этом обеспечивается разбавление продуктов сгорания большим количеством воздуха и снижение их температуры до приемлемой для системы вентиляции. Вакуумная камера в этом случае сообщается через задвижку 15 с системой вентиляции, а магистрали для вакуумирования перекрываются.

Вакуумная система, состоящая из группы механических насосов 35, позволяет откачать воздух из вакуумной камеры до минимального давления 6...7 Па за 5...6 мин. Поскольку насосы не предназначены для откачки агрессивных сред, они отсоединяются от камеры вакуумным вентиляем 16 после достижения в ней необходимого давления.

Эвакуация продуктов сгорания ЖРДМТ, работающего при низком давлении окружающей среды в непрерывном или длительном импульсном режиме, осуществляется парожетторным насосом. Газы к насосу поступают по вакуумопроводу 18 и охлаждаются до температуры + 50 °С в теплообменнике 10. Парожетторный насос имеет четыре последовательно работающие ступени 5, 4, 2, 8. После второй, третьей и четвертой ступеней насоса установлены кожухотрубчатые конденсаторы 3, 1 и 9, из которых конденсат собирается через вакуумные вентили 24, 23 и 22 в конденсаторном баке 28, имеющем соответственно три герметичных отсека. Несконденсировавшаяся смесь продуктов сгорания и пара уходит в систему вентиляции, которая при необходимости может быть оборудована системой дожигания.

Топливная система стенда, схема которой приведена на рисунке 3.6 [9], позволяет подавать компоненты топлива под необходимым давлением в ЖРДМТ, производить очистку компонентов от газовых пузырей, осуществлять заправку компонентами магистралей стенда и полостей головки камеры ЖРДМТ, проводить отбор компонентов топлива для анализа и фильтрацию компонентов топлива, выполнять заправку расходного бака во время работы ЖРДМТ и слив топлива из баков в емкости топливохранилища после завершения испытаний.

Управление работой элементов однотипных магистралей подачи горючего и окислителя топливной системы стенда осуществляется с пульта управления. В топливной системе стенда используются нормально закрытые пневмогидроклапаны, срабатывание которых осу-

ществляется при подаче сжатого воздуха от электропневмоклапанов. Каждая система имеет бак 9 для хранения на стенде необходимого запаса компонента и небольшой расходный бачок 7 с уровнемером-расходомером 8. Для наддува баков в системе хранения и подачи горючего используется газообразный сжатый азот, а для баков системы окислителя – сжатый воздух. Воздух является также рабочим телом системы автоматике стенда и используется для выполнения вспомогательных технологических работ.

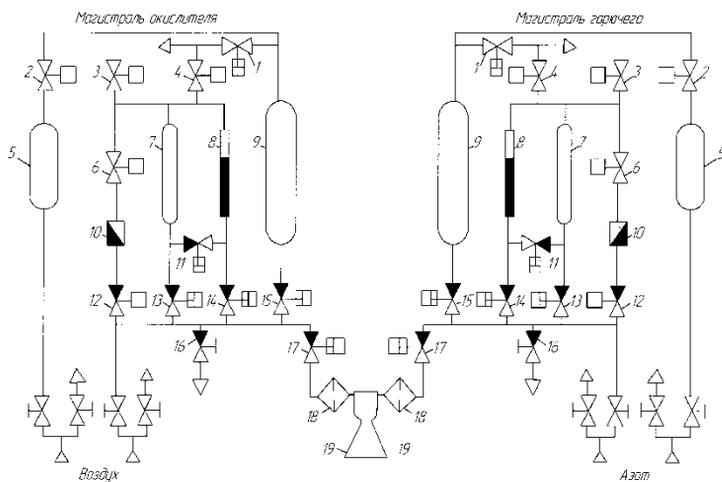


Рисунок 3.6 – Топливная система стенда: 1...4, 6 – пневмоклапаны; 5 – ресивер; 7, 9 – расходные топливные баки; 8 – расходомер-уровнемер; 10 – сильфонные расходомеры; 11...15, 17 – пневмогидроклапаны; 16 – вентиль; 18 – фильтр; 19 – ЖРДМТ

Требуемые давления наддува баков компонентов топлива устанавливаются с помощью газовых редукторов, расположенных на пульте управления. Контроль давлений осуществляется по манометрам, находящимся на щитке перед оператором. Для поддержания постоянного давления наддува компонентов обе системы имеют ресиверы 5. Уменьшение давления в полостях над жидкими компонентами осуществляется посредством открытия дренажных пневмогидроклапанов 1 и 4.

Заправка емкостей компонентами топлива и перекачка их из одних емкостей в другие осуществляется с помощью пневмоклапанов и пневмогидроклапанов 1, 2, 3, 4, 11, 13, 14, 15. Ручные вентили 16 служат для подсоединения к стенду внешних топливных емкостей

при заправке баков стенда или при полном сливе из них компонентов. Пневмогидроклапаны 6 и 12 обеспечивают работу сильфонных расходомеров 10. Пневмогидроклапаны 17 расположены в непосредственной близости от ЖРДМТ 19 и выполняют функции отсечных стендовых клапанов. В каждой из топливных магистралей предусмотрены также фильтры 18.

Для контроля за работой пневмогидроклапанов на пульте выполнена мнемосхема, аналогичная приведенной на рисунке 3.6, при срабатывании того или иного пневмогидроклапана загорается сигнальная лампочка.

Как правило, на стенде осуществляется вакуумная заправка топливных магистралей, уровнемеров и полостей головки камеры ЖРДМТ компонентами топлива. Для этого предусмотрены специальные краны, которые открываются перед заправкой и соединяют топливные полости с системой вакуумирования. После вакуумирования указанных полостей процесс заправки осуществляется одновременно обоими компонентами под низким давлением при открытых клапанах ЖРДМТ. Заправка прекращается после наступления устойчивой огневой работы ЖРДМТ.

На стенде в некоторых случаях предусматривается возможность термостатирования компонентов топлива и ЖРДМТ. Методы термостатирования могут быть самые разные. Один из них, рассмотренный в [10], состоял в следующем. ЖРДМТ с герметизированными выводами от штепсельного разъема и первичных преобразователей давления и температуры крепится на съемном фланце вакуумной камеры внутри теплоизолированного контейнера (см. рисунок 3.7). Там же расположены дополнительные топливные бачки. При охлаждении контейнер заливается до определенного уровня спиртом и по специальному трубопроводу, конец которого введен внутрь контейнера, в спирт вдувается жидкий азот. Такая схема обеспечивает быстрое и равномерное охлаждение предварительно заправленного ЖРДМТ и топливных магистралей. Регулированием подачи жидкого азота устройство позволяет выдерживать заданную температуру с точностью  $\pm 1$  °С при охлаждении топлива и ЖРДМТ до  $- 50$  °С. Для проведения испытаний при положительных температурах до  $+ 50$  °С контейнер заливается водой, которая подогревается электрическим нагревателем. Температуры ЖРДМТ и компонентов топлива на входе в двигатель измеряются датчиками температуры.

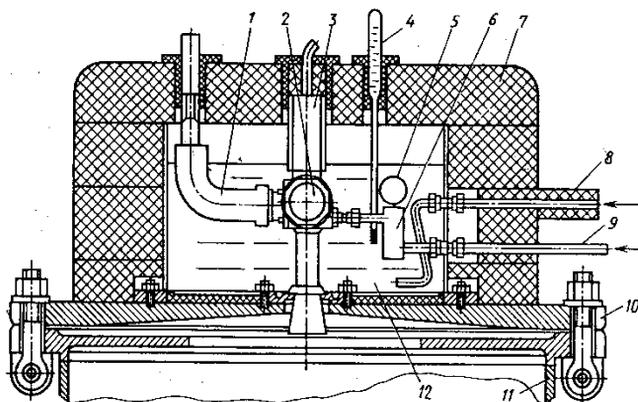


Рисунок 3.7 – Устройство для термостатирования компонентов топлива и ЖРДМТ:

- 1 – преобразователь давления первичный; 2 – ЖРДМТ; 3 – разъем штепсельный;  
 4 – датчик температуры; 5 – преобразователь температуры первичный; 6 – бачок топливный;  
 7 – контейнер; 8 – канал подвода жидкого азота; 9 – канал подвода топлива;  
 10 – фланец съемный; 11 – камера вакуумная; 12 – спирт (вода)

Стенды оборудуются также системами управления, измерения и регистрации параметров.

### 3.2.3 Система измерений параметров ЖРДМТ

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

- тяга, создаваемая двигателем;
- расходы компонентов топлива;
- давления газов в камере сгорания, барокамере, компонентов в магистралях на входе в двигатель, в баках и др.;
- температуры компонентов топлива, стенок конструкции и т. д.;
- время работы двигателя.

Полный перечень и технические характеристики измеряемых и регистрируемых параметров в процессе огневых испытаний ЖРДМТ приведены в таблице 3.1.

При испытаниях ЖРДМТ характерны измерения малых по абсолютному значению тяг и секундных расходов топлива и быстроизменяющихся параметров в импульсном режиме работы. Средства

измерения этих параметров должны обеспечивать надежную информацию о работе двигателя как в непрерывных, так и в импульсных режимах.

**Таблица 3.1 - Измеряемые и регистрируемые параметры в процессе огневых испытаний ЖРДМТ**

№ п/п	Наименование параметра, его размерность	Диапазон измерений	Погрешность измерений	Частота регистраций, Гц
1	2	3	4	5
1	Тяга двигателя, Н	0,1-1600	± 1 % ±3 %	10-200 ≥ 1000
2	Давление в камере сгорания, МПа	0,1-2,5	± 0,4 % ± 2 %	1-10 1000
3	Давление компонентов топлива на входе в двигатель, МПа	0,1-3,0	± 0,4 % ± 2 %	1-10 1000
4	Давление наддува бачков, уровней компонентов топлива, МПа	0,5-3,0	± 0,4 %	1-10
5	Температура компонентов топлива на входе в двигатель, °С	- 50... +50	± 2 %	1-10
6	Средний массовый расход компонентов топлива, г/с	0,1-400	± (0,5-2,5) %	1-500
7	Температура конструкции ЖРДМТ, °С	-50... +1500	± (1...2)%	1-10
8	Ток через электроклапаны ЖРДМТ, А	0-0,5	±2 %	1000
9	Напряжение питания электроклапанов ЖРДМТ, В	0-36	±1 %	1000
10	Давление окружающей среды, мм рт. ст.	10 <sup>-2</sup> - 1 1-800	± 50 % ± 5 %	1-10 -
11	Температура окружающей среды, °С	- 50... + 50	± 2 %	1-10
12	Время, с	0,01-1 ≥(1-150)	± 1 % ± 1 %	1000 1-10

При измерении медленно изменяющихся или стационарных параметров точность измерения не зависит от инерционности средств измерения, что существенно облегчает задачу. Возможность исследования неустановившихся процессов обеспечивают измерительные устройства с весьма высокими собственными частотами, для полу-

чения 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.

В настоящем разделе рассмотрены лишь те методы и средства измерений, которые присущи ЖРДМТ и, как правило, не являются стандартными. Как отмечалось, их особенность обусловлена, в первую очередь, необходимостью оценки параметров в импульсном режиме работы, при котором качество переходных процессов существенно сказывается на характеристиках ЖРДМТ.

Подробная информация о стандартных методах и средствах измерений параметров двигателей летательных аппаратов, в частности ЖРДМТ, представлена в [23].

### 3.2.3.1 Измерение тяги ЖРДМТ

Величину тяги, создаваемую ЖРДМТ, измеряют либо путем измерения силы реакции, которую оказывают узлы крепления двигателя, расположенные на испытательном станке, препятствуя его перемещению при работе в направлении действия тяги, либо путем измерения импульса силы, создаваемого 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 по конструктивному исполнению устройствах [9, 10, 22]. Рассмотрим некоторые из них.

Среди тягоизмерительных устройств, действующих на реактивном принципе, широко применяется устройство в виде консольно закрепленной на массивной опоре упругой балки, на которую монтируется ЖРДМТ обычно в вертикальном положении, соплом вниз (рисунок 3.8).

При работе ЖРДМТ балка прогибается и по значению упругой деформации можно определить значение действующей тяги двигателя. Возникающие в балке напряжения регистрируются, например, с помощью двух тензопреобразователей, наклеенных для увеличения выходного электрического сигнала на противоположные верхнюю и нижнюю стороны балки. Чтобы быстро погасить колебания

упругой системы, появляющиеся в момент начала и окончания работы ЖРДМТ, а также при переходе с одного режима на другой, применяется гидравлический демпфер.

Данное тягоизмерительное устройство обеспечивает высокую точность (до  $\pm 1,0\%$ ) измерения тяги на непрерывных режимах работы ЖРДМТ. Однако при малой продолжительности импульса точность измерений существенно снижается. Связано это с тем, что

в реактивном тягоизмерительном устройстве двигатель монтируется непосредственно на чувствительный элемент – балку, что приводит к увеличению суммарной массы элемента и в конечном счёте не позволяет получить необходимую для ре-

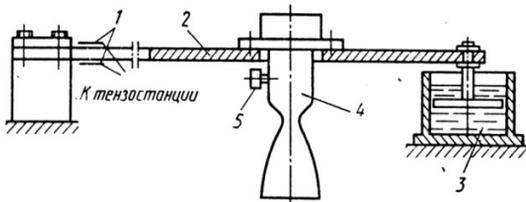


Рисунок 3.8 – Схема измерения тяги ЖРДМТ реактивным методом: 1 – тензопреобразователь; 2 – упругая балка; 3 – гидравлический демпфер; 4 – ЖРДМТ; 5 – датчик измерения давления в камере сгорания

гистрации быстроизменяющейся тяги высокую собственную частоту колебаний измерительной системы. Собственная частота колебаний рассматриваемой системы может быть определена по формуле:

$$f_{\text{собств}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{(m_{\text{дв}} + \varepsilon m_{\text{б}})\Delta}}, \quad (3.1)$$

где  $P$  – тяга двигателя;  $m_{\text{дв}}$  и  $m_{\text{б}}$  – соответственно массы двигателя и упругой балки, участвующих в колебательном процессе;  $\varepsilon$  – коэффициент, зависящий от взаимного расположения ЖРДМТ и балки;  $\Delta$  – перемещение центра масс ЖРДМТ под действием тяги двигателя  $P$ .

Анализ показывает, что собственные частоты колебаний механической части реактивного тягоизмерительного устройства не превышают 200 Гц. Поэтому данная система пригодна только для измерения тяги в стационарных (непрерывных) и квазистационарных режимах работы ЖРДМТ.

Частоту собственных колебаний механической части тягоизмерительного устройства удаётся существенно (до нескольких килогерц) увеличить при активном методе измерения тяги (рисунок 3.9) [10, 23], когда измеряется не реакция истекающих из сопла газов, а прямое силовое воздействие сверхзвуковой струи. При этом методе двигатель фиксируется, а за соплом ЖРДМТ устанавливается лёгкая газоприёмная ловушка закрытого типа, обеспечивающая поворот газов строго на  $90^\circ$  по отношению к оси ЖРДМТ и их отвод в радиальном направлении.

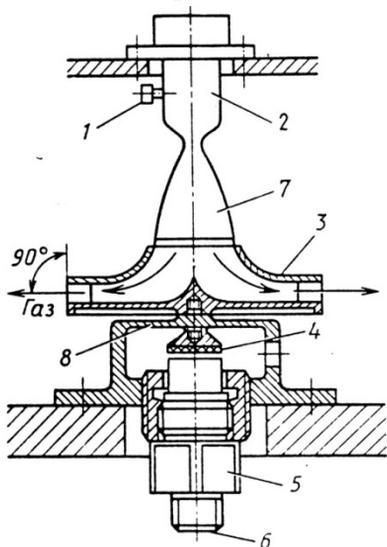


Рисунок 3.9 – Схема активного тягоизмерительного устройства: 1 – первичный преобразователь для измерения давления в камере сгорания; 2 – ЖРДМТ; 3 – ловушка; 4 – феррит; 5 – индуктивный или емкостной первичный преобразователь; 6 – разъем; 7 – сопло; 8 – мембрана

Ловушка закрытого типа, обеспечивающая поворот газов строго на  $90^\circ$  по отношению к оси ЖРДМТ и их отвод в радиальном направлении. Ловушка жёстко связана с мембраной, являющейся упругим силовым элементом тягоизмерительного устройства. Мембрана рассчитывается на заданную силу, а её прогиб определяется возможностями первичного преобразователя 5. Для повышения собственной частоты колебаний механической части тягоизмерительного устройства целесообразны возможно меньшие перемещения. Для регистрации малых перемещений может быть приспособлена серийная аппаратура, предназначенная для измерения давления. Например, в конструкции одного из активных тягоизмерительных устройств использован преобразователь индуктивного типа ДД-10 со срезанной мембраной, при этом собственная частота колебаний механической части тягоизмерительного устройства составила 1450 Гц.

На рисунке 3.10 приведён фрагмент осциллограммы для режима запуска с записью тяги ( $P_{\text{ном}} = 25 \text{ Н}$ ), измерявшейся одновременно реактивным ( $f_{\text{собств}} = 55 \text{ Гц}$ ) и активным ( $f_{\text{собств}} = 1450 \text{ Гц}$ ) тягоизмерительными устройствами [10]. Здесь же показаны изменения давлений на входе ЖРДМТ по линиям горючего  $p_{\text{Г}}$ , окислителя  $p_{\text{О}}$ , в

камере сгорания  $p_K$ , силы тока  $I$  и напряжения  $U$  на обмотках электромагнитных топливных клапанов, а также отметки времени  $\tau$ .

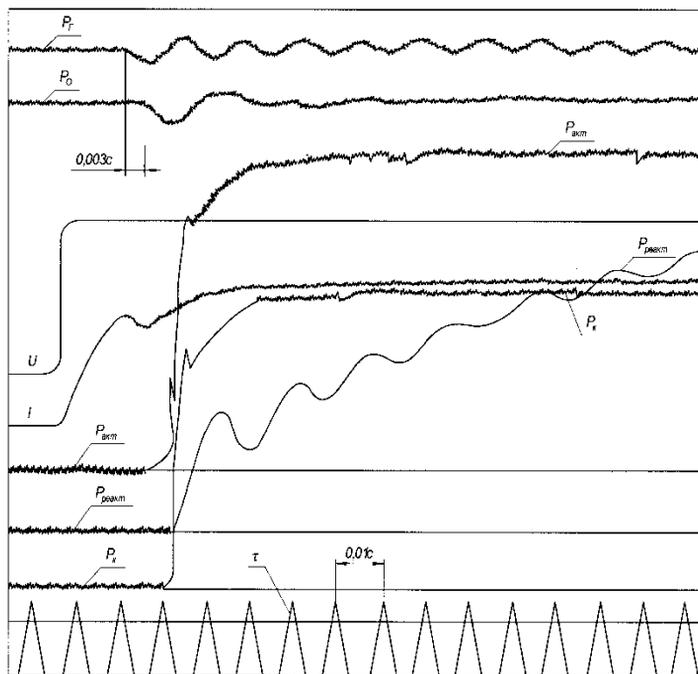


Рисунок 3.10 – Фрагмент осциллограммы с записью тяги ЖРДМТ активным и реактивным тягоизмерительными устройствами

Из сравнения представленных на осциллограмме данных видно, что результаты измерения тяги активным тягоизмерительным устройством более адекватно отражают изменение давления в камере сгорания. Определение же тяги на переходных режимах реактивным тягоизмерительным устройством затруднительно из-за влияния инерциальных и демпфирующих сил. Инерциальные силы существенны в связи со значительной массой ЖРДМТ и балки.

### 3.2.3.2 Измерение расходов компонентов топлива

Наряду с тягой, расходы компонентов топлива позволяют оценить энергетическую эффективность ЖРДМТ, поэтому точность их измерения должна быть высокой. Особенности измерения расходов при испытаниях ЖРДМТ обуславливают их малыми значениями, значительным изменением в течение переходного процесса и пульсацией, вызываемой волновыми явлениями в трубопроводах.

Обычно измеряют объемный расход компонентов топлива за время работы ЖРДМТ как в непрерывных, так и в импульсивных режимах, а затем пересчитывают на массовый расход. Так как практически отсутствуют средства, позволяющие с удовлетворительной точностью фиксировать мгновенные значения расходов компонентов топлива, то ставят задачу экспериментального определения расхода в единицу времени или суммарного расхода за импульс.

При проведении испытаний ЖРДМТ широкое распространение получили объемные расходомеры-уровнемеры, выполненные в виде стеклянной калиброванной трубки в сочетании с миллиметровой шкалой. Постоянство диаметра по длине трубки расходомера обеспечивает линейность его характеристик. Диаметр трубки подбирают таким образом, чтобы обеспечивалась возможность фиксации с достаточной точностью измерения уровня при самом коротком импульсе, например, 10...15 мм для импульса продолжительностью 0,03 с.

Для измерения расхода в непрерывном режиме параллельно основному – объемному расходомеру устанавливают дополнительную мерную емкость в виде бачка, откалиброванную совместно с основным расходомером. В суммарную погрешность измерения расходов входят погрешности калибровки расходомеров, погрешности отсчета уровня при измерении, погрешности определения плотности компонентов топлива, в том числе и связанные с определением их температуры. Данный метод позволяет обеспечивать точность измерений, при которой предельная погрешность определения массового расхода на непрерывном режиме находится в пределах  $\pm 1\%$ , а расхода за импульс – в пределах  $\pm 3\%$ .

Большим недостатком описанного метода измерения расхода являлась трудность непосредственного ввода получаемой информации в автоматизированные средства сбора и обработки результатов испытаний. Для автоматизации рассмотренного выше объемного уровнемера-расходомера и повышения его точности был предложен ряд конструктивных решений выполнения его с использованием ультразвукового датчика (рисунок 3.11) [10], датчика перепада давления (рисунок 3.12) [20], магнитострикционного или индуктивно-потенциометрического датчика поплавкового типа (рисунок 3.13) [22] и др.

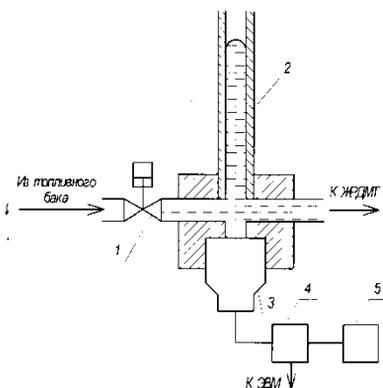


Рисунок 3.11 – Схема ультразвукового расходомера: 1 – клапан; 2 – участок расходомерный; 3 – излучатель-приемник; 4 – блок управляющий электронный; 5 – устройство визуального отсчета измерений

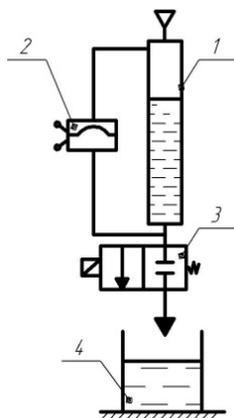
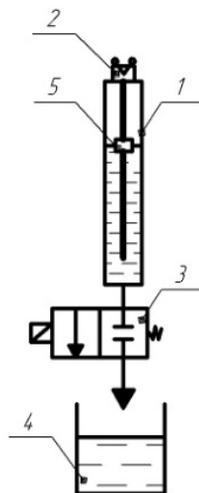


Рисунок 3.12 – Объемный уровнемер-расходомер на базе датчика перепада давления: 1 – трубка уровнемера; 2 – датчик перепада давления; 3 – стендовый электромагнитный клапан; 4 – емкость для приема рабочей жидкости или подача жидкости к изделию

Рисунок 3.13 – Объемный уровнемер-расходомер на базе магнитострикционного или индуктивно-потенциометрического датчика поплавкового типа: 1 – трубка уровнемера; 2 – магнитострикционный или индуктивно-потенциометрический датчик поплавкового типа; 3 – стендовый электромагнитный клапан; 4 – емкость для приема рабочей жидкости или подача жидкости к изделию; 5 – поплавок с магнитом



Работа ультразвукового расходомера (рисунок 3.11) основана на принципе ультразвуковой локации уровня компонентов топлива на расходомерном участке 2, куда жидкость поступает через клапан 1. Излучатель-приемник 3 выдает модулируемые прямоугольными импульсами ультразвуковые колебания. Между излучаемыми и отраженными от верхнего мениска импульсами имеется временной интервал, пропорциональный высоте столба жидкости. В электронном управляющем блоке 4 происходит преобразование сигнала, который вводится затем в ЭВМ и может также передаваться на устройство визуального отсчета измерений 5. К одному электронному блоку может быть подключено несколько излучателей-приемников.

Порог чувствительности, определенный экспериментально для некоторых штатных компонентов топлива, находится на уровне  $\pm 0,1$  мм. Основная предельная погрешность измерения не превышает  $\pm 0,5$  %. Она зависит от степени поглощения ультразвуковых колебаний рабочей жидкостью. Для уменьшения этого влияния следует повышать мощность излучателя-приемника.

В объемном уровнемере-расходомере, выполненном на базе датчика перепада давления, измеряется величина гидростатического давления столба жидкости, определяемая его высотой. Точность измерения расхода с помощью данного метода обеспечивается достаточно высокой и основная предельная погрешность измерения может не превышать  $\pm 0,4$  %. Недостатком метода является относительно большая инерционность, обусловленная инерционностью развитой мембраны датчика перепада давления. Поэтому данный расходомер можно использовать лишь при измерении среднего расхода компонентов за время включения ЖРДМТ.

Объемный уровнемер-расходомер, выполненный на базе магнитострикционного или индуктивно-потенциметрического датчика поплавкового типа, позволяет измерять уровень жидкости с более высокой точностью до  $\pm 0,1$  мм и, следовательно, обеспечивает низкую предельную погрешность измерения. Динамические характеристики такого расходомера выше и составляют не менее 100 Гц.

Среди нестандартных измерительных средств измерения расхода необходимо отметить также сильфонные расходомеры [10].

Схема работы сильфонного расходомера представлена на рисунке 3.14. При работе ЖРДМТ компонент топлива вытекает из внутренней полости сильфона 3, находящегося под рабочим давле-

нием, и поступает через клапан 4 в камеру сгорания. С подвижной стенкой сильфона жестко связан первичный преобразователь перемещения 5, регистрирующий его осевую деформацию. Сильфон заправляется компонентом топлива в перерывах между включениями через заправочный клапан 2 из емкости 1. Команда на открытие и закрытие заправочного клапана вырабатывается блоком управления 6 в зависимости от сигналов регулятора и первичного преобразователя перемещения. Блок дифференцирования 7 преобразует сигнал перемещения в скорость перемещения и позволяет таким образом определять как мгновенные значения расходов, так и объемный расход за импульс. Сигналы от блока дифференцирования и первичных преобразователей перемещений могут поступать как на регистратор 8, так и в систему автоматизированного сбора и обработки результатов испытаний.

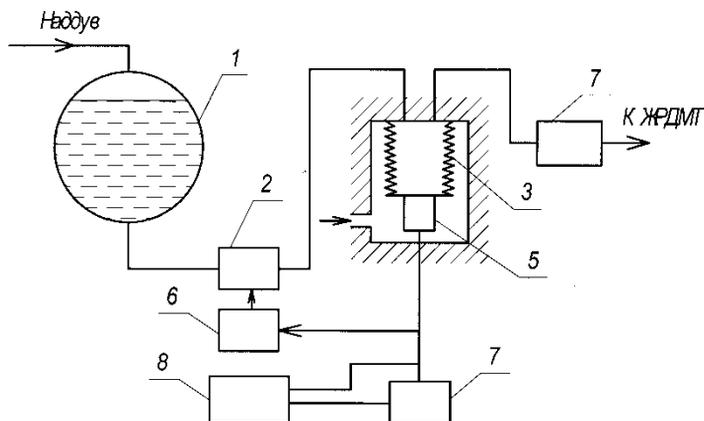


Рисунок 3.14 – Схема сильфонного расходомера: 1 – емкость; 2 – клапан заправочный; 3 – сильфон; 4 – клапан; 5 – преобразователь перемещения первичный; 6 – блок управления; 7 – блок дифференцирования; 8 – регистратор

Среди других расходомеров при испытаниях ЖРДМТ находят применение расходомеры с измерением перепада давления на сужающемся устройстве и турбинные расходомеры [22, 23].

### 3.2.3.3 Измерение давлений

Давления в камере сгорания, топливных и пневматических магистралях измеряют в основном с помощью стандартных средств измерения [23]. При этом достигается удовлетворительная точность измерений стационарных значений давления на непрерывных режимах работы.

Измерение быстроменяющихся давлений осуществляется электрическими методами – довольно часто с помощью первичных преобразователей – датчиков давления индуктивного типа (рисунок 3.15) [9, 10], собственная частота колебаний чувствительного элемента которых составляет 5 кГц. В качестве чувствительного элемента в этом первичном преобразователе используется жесткая мембрана. При измерении давления в камере сгорания принимаются меры для защиты мембраны от воздействия высоких температур. Для этого датчик давления помещается в корпус, охлаждаемый проточной водой.

Первичный преобразователь индуктивного типа работает по принципу изменения индуктивности при прогибе упругой мембраны.

Мембрана 1, воспринимающая изменение 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  $\pm 50$  °С. Индуктивность рабочей катушки

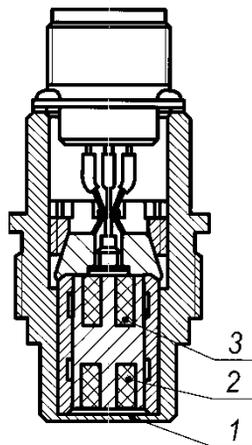


Рисунок 3.15 – Первичный преобразователь индуктивного типа

$$L \approx 1,25 \cdot 10^{-8} k \frac{S_B}{l_B} N^2, \quad (3.2)$$

где  $S_B$  – площадь поперечного сечения магнитного потока в воздушном зазоре между мембраной и катушкой;  $l_B$  – средняя длина магнитных силовых линий в воздушном зазоре;  $N$  – 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  $l_B$ , т. е. прогибу мембраны. Сигнал с первичного преобразователя давления поступает на усилитель-преобразователь и после него – на осциллограф или адаптер ПЭВМ.

Кроме того, сложность определения давлений в импульсных режимах работы ЖРДМТ состоит в том, что при этом возможны динамические искажения, вносимые измерительным каналом. Дело в том, что небольшие размеры камер сгорания испытуемых ЖРДМТ и высокие температуры газов часто не позволяют устанавливать существующие первичные преобразователи давления непосредственно на камеру. В этом случае камера сгорания с первичным преобразователем соединяется трубопроводом. Особенно характерно это для серийных ЖРДМТ. Введение трубопровода – промежуточного звена, обладающего определенными газодинамическими характеристиками, приводит к различию между реальными и измеренными значениями давления.

Динамическая характеристика простейшего газодинамического соединительного звена с достаточной степенью точности описывается дифференциальным уравнением второго порядка [10]

$$\frac{1}{\omega_T^2} \frac{dp_M^2}{dT^2} + \frac{2\varepsilon_T}{dT} p_M = p_k, \quad (3.3)$$

где  $p_M$  – давление под мембраной первичного преобразователя;  $p_k$  – давление в камере сгорания;  $\varepsilon_T$  – коэффициент затухания колебаний в трубопроводе;  $\omega_T$  – частота колебаний давления газа в трубопроводе.

Частота колебаний давления газа в трубопроводе  $\omega_T$  определяется геометрическими параметрами соединительного устройства:

$$\omega_T = \frac{a}{l_T} \sqrt{\frac{V_T}{V_M}}. \quad (3.4)$$

В выражении (3.4)  $a$  – скорость звука;  $l_T$  – длина трубопровода;  $V_T$  – объем трубопровода;  $V_M$  – объем полости под мембраной.

Коэффициент затухания  $\varepsilon_T$  обычно определяют экспериментально, его значение находится в пределах 0,8...2,4. При неизменной длине трубопровода динамические искажения давления увеличиваются с уменьшением площади сечения трубопровода и увеличением объема полости под мембраной.

При увеличении площади сечения трубопровода динамическая погрешность измерения уменьшается, но при площади сечения, соизмеримой с площадью минимального сечения камеры сгорания, происходит искажение процесса в камере сгорания из-за увеличения присоединенного объема и из-за колебаний расхода на переходных режимах работы ЖРДМТ.

При разработке системы измерения давления необходимо оптимизировать значение площади сечения трубопровода, обеспечивая допустимые изменения процесса в камере сгорания и не допускающей слишком большие динамические погрешности. Однако для ЖРДМТ с номинальной тягой менее 1 Н даже оптимальный выбор геометрических размеров соединительного трубопровода не обеспечивает достаточную точность измерения [10]. В этом случае целесообразно применять специальные методы обработки результатов испытаний, суть которых сводится к восстановлению  $p_k(\tau)$  по измеренному значению  $p_M(\tau)$ . Взаимосвязь этих величин описывается выражением (3.3).

Из выражения (3.3) следует, что для восстановления значения  $p_k(\tau)$  необходимо вычислить первую и вторую производные от функции  $p_M(\tau)$ . Однако значение  $p_M$  известно с погрешностью, обусловленной несовершенством измерительной аппаратуры.

### **3.2.4 Автоматизированная система управления и информационного обеспечения испытаний ЖРДМТ**

Автоматизированная система управления и информационного обеспечения испытаний ЖРДМТ обеспечивает:

- управление объектом исследования и системами стенда;
- измерение с требуемой точностью всех необходимых параметров (тяги, импульса тяги, расходов компонентов топлива, давления в камере сгорания и др.);
- сбор и регистрацию экспериментальной информации об испытуемом объекте;
- обработку, анализ и представление в требуемом виде результатов эксперимента в реальном времени.

Рассмотрим пример реализации автоматизированной системы управления и информационного обеспечения для проведения испытаний ЖРДМТ на вакуумных огневых стендах с целью определения выходных, удельных и динамических параметров, а также статических и динамических характеристик ЖРДМТ в импульсных и непрерывных режимах работы, а также для обработки, анализа и представления результатов эксперимента в требуемом виде [22, 24].

При подготовке и в процессе испытаний рассматриваемая автоматизированная система обеспечивает выполнение следующих функций:

- управление работой ЖРДМТ по заданной циклограмме;
- управление работой гидравлическими и пневматическими электроклапанами пневмогидравлической системы стенда;
- проведение градуировок каналов для измерения параметров ЖРДМТ: тяги, расходов компонентов, давлений, температур и др.;
- сбор информации с измерительных каналов стенда при проведении испытаний и хранение информации на жестком диске;
- обработка результатов измерений на компьютере в ходе испытаний и их представление в требуемой форме (в виде протоколов, характеристик, графиков и таблиц);
- формирование базы данных исследованных двигателей.

Рассматриваемая автоматизированная система стенда позволяет осуществлять:

- ✓ регистрацию до 20 аналоговых сигналов в диапазоне  $-5...+5$  В или  $-0,5...+0,5$  В;
- ✓ регистрацию до 20 дискретных сигналов с характеристиками: «0»  $-1...5$  В, «1»  $-10...15$  В;

- ✓ формирование до 50 управляющих дискретных сигналов в диапазоне 0...+30 В;
- ✓ частоту опроса измерительных каналов в среднем до 25 кГц на канал при специальных экспериментах за счет уменьшения числа измеряемых параметров – до 20 МГц/ канал;
- ✓ регистрацию до 50 значений температур испытуемого изделия, компонентов топлива и пр.;
- ✓ дискретность отсчета времени до 0,1 мс.

На рисунке 3.16 представлена структурная схема автоматизированной системы управления и информационного обеспечения исследований ЖРДМТ.

Автоматизированная система включает в себя промышленный компьютер с адаптерами для формирования сигналов управления на испытываемый ЖРДМТ и клапаны пневмогидравлической системы стенда, а также сбора информации с измерительных каналов стенда. Для согласования сигналов с выходов адаптеров, установленных в компьютере, с сигналами управления клапанами ЖРДМТ и пневмогидравлической системы стенда установлены транзисторные ключи, которые обеспечивают необходимые токи и напряжения для включения клапанов при получении сигналов от компьютера.

Основным устройством автоматизированной системы является промышленный компьютер. В состав компьютера входят дисплей, принтер, клавиатура и мышь. Электропитание компьютера осуществляется от блока бесперебойного питания.

Компьютер оснащен адаптером аналогового ввода-вывода типа А821-PGH, АЦП типа ISO-813 и двумя платами реле типа AR-D2103. Адаптер аналогового ввода-вывода А821-PGH используется для формирования команд управления на испытываемый двигатель и для преобразования измерительных сигналов в цифровой код (АЦП) и ввода их в ЭВМ.

Основные параметры адаптера:

- число вводимых аналоговых сигналов (АЦП) – 16;
- частота преобразования аналоговых сигналов в цифровой код – до 40 кГц/канал;
- диапазоны вводимых измерительных сигналов –5...+5 В, –0,5...+0,5В, –0,05...+0,05 В и –0,005...+0,005 В;
- погрешность преобразования – не более 0.1%;

- число выводимых аналоговых сигналов 1, диапазон напряжений  $-5...+5$  В;
- число выводимых дискретных сигналов типа TTL – 16;
- число вводимых дискретных сигналов – 16.

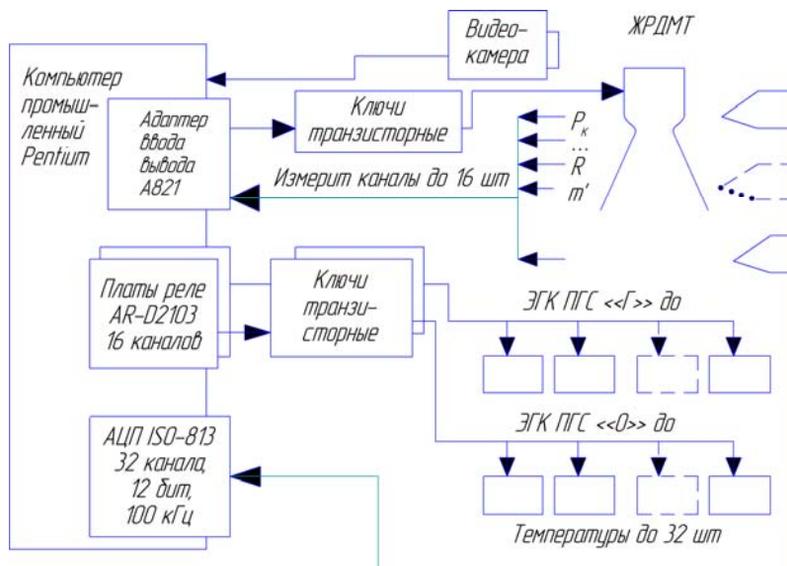


Рисунок 3.16 – Структурная схема автоматизированной системы управления и информационного обеспечения испытаний и исследований ЖРДМТ

Параметры модуля АЦП типа ISO-813, используемого для измерения температур:

- число каналов АЦП – 32;
- диапазон напряжений измерительных сигналов  $-5...+5$  В;  $-2,5...+2,5$ В,  $-1,25...+1,25$  В и  $-0,675...+0,675$  В;
- частота преобразования – до 125 кГц/канал;
- погрешность преобразования – не более 0.1%.

Параметры плат реле типа AR-D2103, используемых для управления гидро- и пневмоэлектроклапанами пневмогидравлической системы стенда:

- общее число реле, управляемых компьютером – 16;
- число реле с контактами, работающими на размыкание и замыкание – 4;
- число реле с контактами, работающими на замыкание – 12;
- ток через контакты реле – до 1 А, напряжение – до 110 В.

Используемый промышленный компьютер позволяет расширять возможности автоматизированной системы путем установки в компьютер дополнительных блоков (адаптеров ввода-вывода, релейных и бесконтактных плат управления и пр.).

Программное обеспечение системы работает в среде системы Windows, для выбора режимов работы программы и ввода данных используется современный интерфейс, вид формы программы на дисплее компьютера для одного из режимов ее работы приведен на рисунке 3.17.

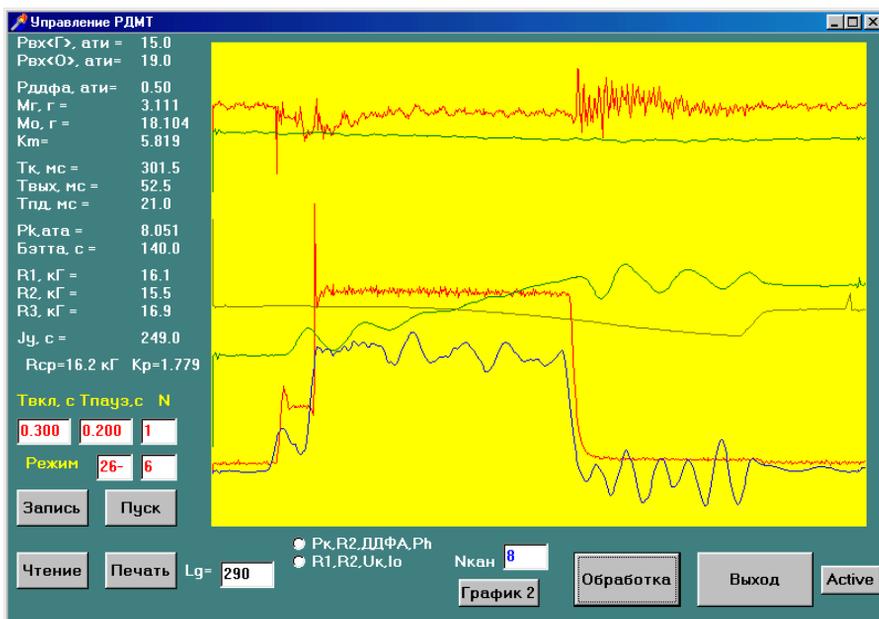


Рисунок 3.17 – Интерфейс программы на дисплее компьютера на режиме «Управление»

В программное обеспечение автоматизированной системы входят следующие блоки:

- проведения калибровок аналоговых каналов, обработка результатов калибровки с использованием методов наименьших квадратов или кусочно-линейной интерполяции (по выбору оператора), оценка погрешностей градуировок;
- задание режимов работы ЖРДМТ и переменных для обработки результатов экспериментов;
- включения ЖРДМТ по заданной циклограмме, управление ПГС стенда в процессе испытаний;
- сбор, обработка и отображение информации о параметрах объекта в темпе испытаний;
- создание баз экспериментальных данных.

Основные режимы работы программы следующие:

- режим «Файл» позволяет осуществлять действия с результатами ранее проведенных испытаний, найти соответствующие файлы, просмотреть результаты измерений в виде таблиц и графиков;
- режим «Настройка» позволяет задавать параметры двигателей, необходимые при обработке, параметры измерительных каналов, из этого же режима осуществляется вызов блока калибровки измерительных каналов;
- режим «Управление» (рисунок 3.17) задает параметры для задания циклограммы работы двигателей, а именно – длительность работы и опережение или задержка включения модуля зажигания, задержки включения клапанов двигателя;
- режим «Протокол» позволяет выдать результаты обработки на принтер.

На экран дисплея одновременно выводятся до четырех графиков измеренных параметров, можно также вызвать любые другие регистрируемые параметры. Аварийное отключение двигателя заложено в программе.

Общий вид автоматизированной системы управления и информационного обеспечения исследований ЖРДМТ, выполненный в рамках компьютерной стойки, представлен на рисунке 3.18.

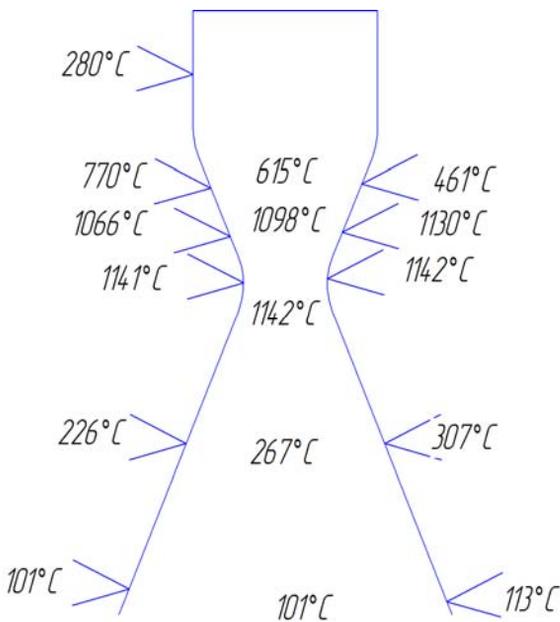


Рисунок 3.18 – Общий вид автоматизированной системы управления и информационного обеспечения испытаний и исследований ЖРДМТ

Некоторые возможности системы иллюстрируются протоколами испытаний ЖРДМТ при определении динамических и энергетических параметров ЖРДМТ и исследовании теплового состояния конструкции двигателя, представленными в таблице 3.2 и на рисунке 3.19.

**Таблица 3.2 – Протокол испытаний ЖРДМТ по определению динамических временных и удельных параметров двигателя в импульсном режиме работы**

Программа 15-11				Режим 6-111			
Число включений ЖРДМТ - 5							
Горючее		$p_{вх}=1,7\text{МПа}$	$T_{вх}=22^{\circ}\text{C}$	Уровнемер - 360 дел		$M_1=64.52\text{г}$	
Окислитель		$p_{вх}=3,6\text{МПа}$	$T_{вх}=22^{\circ}\text{C}$	$\Delta p=0,0875\text{ МПа}; M_0=274,1\text{ г}$			
№ ВКЛ	$\tau_{вкл}, \text{мс}$	$\tau_{о,к\Gamma}, \text{мс}$	$\tau_{о,к\text{о}}, \text{мс}$	$\tau_{з,к\Gamma}, \text{мс}$	$\tau_{з,к\text{о}}, \text{мс}$	$\tau_{зв}, \text{мс}$	$\tau_{0,9}, \text{мс}$
1	57	10	19	13	20	50	55
2	57	10	19	13	20	41	46
3	57	10	19	13	20	41	45
4	57	10	19	13	20	42	46
5	57	10	19	13	20	41	46
№ ВКЛ	$\tau_{ид}, \text{мс}$	$\tau_{имп}, \text{мс}$	$M_{\Gamma}', \text{г}$	$M_0', \text{г}$	$K_{м}, -$	$P_{имп}, \text{МПа}$	$I_y, \text{м/с}$
1	47	27	12,9	54,8	4,25	0,671	1364
2	46	33	12,9	54,8	4,25	0,653	1658
3	47	33	12,9	54,8	4,25	0,643	1658
4	45	33	12,9	54,8	4,25	0,658	1648
5	45	33	12,9	54,8	4,25	0,661	1658



### Режим 1803

$P_T=16,5$  ата  $T_T=21^\circ\text{C}$   
 $L_T=37$   
 $P_O=18,0$  ата,  $T_O=24^\circ\text{C}$   
 $T_{\text{ВКЛ}}=0,515$  с  
 $P_K=7,509$  ата  
 $P_{\text{Ш}}=0,645$  ата  
 $P_T=15,898$  ата  
 $P_{\text{КО}}=8,931$  ата  
 $M'_T=13,010$  г/с  
 $M'_{\text{ОК}}=37,511$  г/с  
 $M'_{\text{ОЗ}}=8,781$  г/с  
 $M'_{\text{О}\Sigma}=46,292$  г/с  
 $M'_\Sigma=59,301$  г/с  
 $M'_{\text{О}\Sigma}=46,292$  г/с  
 $K_{\text{мк}}=2,883$   
 $K_{\text{мз}}=3,558$   
 $G_3=0,190$

Рисунок 3.19 – Протокол испытаний ЖРДМТ при исследовании теплового состояния его конструкции

### 3.3 Экспериментальное оборудование для исследований рабочего процесса ЖРДМТ

Для более детального изучения различных стадий организации рабочего процесса ЖРДМТ с целью повышения их эффективности и надежности используют более тонкие экспериментальные методы исследований: оптические, химического анализа, тепловые и др. [25].

В данном разделе рассмотрим особенности применения некоторых из них для исследований рабочего процесса и теплового состояния ЖРДМТ.

### 3.3.1 Стенд оптико-физических исследований рабочего процесса ЖРДМТ

Стенд оптико-физических исследований [22], созданный в НИЦ КЭ СГАУ, предназначен для исследований течения однофазных и двухфазных сред в ЖРДМТ и элементах их конструкций в модельных условиях. На стенде реализованы методы, позволяющие проводить экспериментальные работы по исследованию предпламенных процессов и воспламенения, процессов смесеобразования, сложных (пространственных) течений газа в камерах, соплах, сверхзвуковых струях и т.д.

Компоновочная схема стенда оптико-физических исследований представлена на рисунке 3.20.

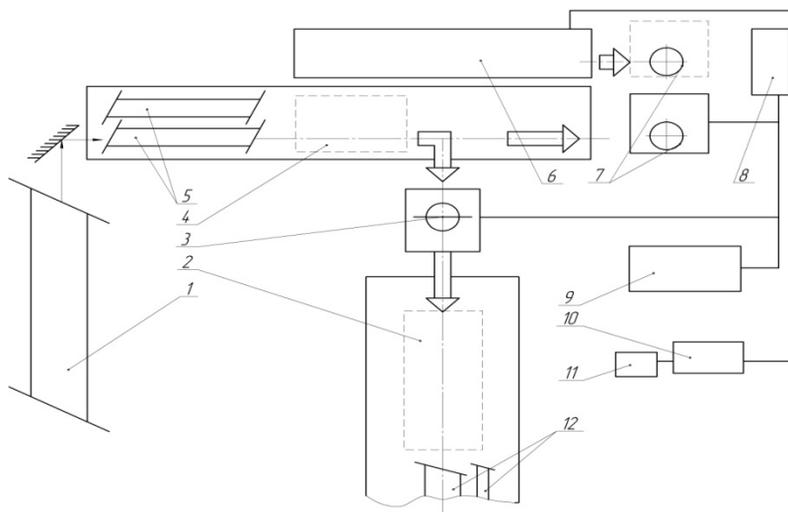


Рисунок 3.20 – Компоновочная схема стенда оптико-физических исследований: 1 – лазер ЛГ-38 (ЛНГ-502); 2 – УИГ-12И; 3 – рабочее место для исследований жидкостных и газожидкостных объектов; 4 – УИГ-1М; 5, 12 – твердотельный рубиновый лазер и ЛГ-79; 6 – оптический блок ЛДА АВС; 7 – рабочее место для исследований газовых объектов; 8 – пульт управления воздухом высокого давления; 9 – пульт управления воздухом низкого давления; 10 – стойка приборов; электронный блок ЛДФФВС, система термоанемометрическая СТ-4; 11 – автоматизированная система

На стенде имеются два рабочих места, одно из которых 7 предназначено для исследования объектов на газообразном рабочем теле (см. рисунок 3.20), а другое 3 – для объектов на жидкостном и газожидкостном рабочих телах. Устройства крепления позволяют ориентировать объект исследования в пространстве и направлять поток (однофазный или двухфазный) в нужном направлении. Элементы рабочих мест обеспечивают: заданный диапазон изменения физических параметров; хранение, измерение параметров и подачу рабочих тел в объект; управление экспериментом в независимом режиме (визуализация, настройка и др. операции), а также в режиме синхронизации с системами лазерной диагностики и ряд других функций.

Основу системы измерения стенда составляют лазерная аппаратура: голографические установки УИГ-1М, УИГ-12И и УГМ-1, лазерный доплеровский анемометр; аргоновый лазер ЛГН-502 и ряд гелий-неоновых лазеров; система термоанемометрическая СТ-4, а также стандартная аппаратура (датчики давления, температуры, усилий, моментов и др., преобразующие и регистрирующие приборы).

Установка импульсная голографическая УИГ-1М предназначена для измерения параметров быстродвижущихся и изменяющих свою форму объектов и быстропротекающих процессов путем получения голограмм и голографических интерферограмм этих объектов и может быть использована при исследовании плазмы, гидро- и аэродинамических процессов, явлений, происходящих в веществе при распространении ударных волн, термодинамических явлений в потоках, процессов массо- и теплообмена, парообразования, распространения акустических волн в прозрачных средах и других нестационарных процессов.

Установка включает в себя оптическую скамью с комплектом механических приспособлений для установки и юстировки оптических элементов, комплект оптики, состоящий из линз, зеркал, диффузоров, светофильтров и т.д.

Универсальность механических приспособлений и оптических элементов, возможность удлинять оптическую скамью с помощью выдвижных штанг позволяют собрать практически любую оптическую схему.

В установке УИГ-1М в качестве источника излучения используется импульсный одномодовый рубиновый лазер и оптические квантовые усилители, излучение с энергией до 0,5 Дж при длительности импульса излучения порядка  $40 \cdot 10^{-9}$  с с длиной волны  $\lambda \approx 0,69$  мкм. Система может работать в ждущем режиме и в режиме, когда исследуемый однократный быстропротекающий процесс начинается по сигналу, вырабатываемому блоком управления установки. В состав УИГ-1М входят: гелий-неоновый лазер ЛГ-52, используемый для юстировки, измеритель энергии лазерного излучения ИКТ-1М, преобразователь ФК-19 для измерения длительности и числа импульсов излучения, механические элементы для юстировки и набор оптических элементов для построения схем голографирования и фотосъемки, лазер ЛГ-38 для восстановления изображения с голограмм.

Дополняют оптические возможности стенда системы УИГ-12И и УГМ-1.

Установка УИГ-12И, обладая, в основном, достоинствами системы УИГ-1М, может быть использована в качестве лазерного интерферометра, т.к. рабочий стол защищен от воздействия внешних вибраций путем установки плиты на амортизирующие резиновые подушки, наполненные воздухом. Она предназначена для получения голограмм и интерферограмм прозрачных и отражающих, стационарных и медленно изменяющихся объектов так же, как установка голографическая малогабаритная.

Система УГМ-1 состоит из сборной станины Т-образного сечения, держателей элементов оптической схемы, объекта и фотопластины, закрепленных к ее вертикальной плите, и лазера, закрепленного к горизонтальному основанию. Благодаря вертикальному расположению рабочей плиты установка нечувствительна к влиянию внешних вибраций. Устройство для точного возвращения голограммы на место экспонирования позволяет производить измерения не только методом двойной экспозиции, но и в реальном времени. Оптические схемы для исследования фазовых и диффузно отражающих объектов имеют фиксированные положения для всех оптических элементов, что упрощает перенастройку и юстировку схем.

Наличие такого набора разноплановых установок, укомплектованных необходимыми механическими и оптическими элементами, их расположение на стенде позволяет формировать исследуемые

зондируемые поля развитыми как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях, а также исследовать физические процессы как квазистационарные, так и быстропеременные, характерные для работы ЖРДМТ в непрерывном и импульсном режимах работы.

Лазерный доплеровский анемометр предназначен для бесконтактного измерения вектора скорости потоков и применяется в гидро- и аэродинамических исследованиях.

#### Основные технические характеристики:

Размер регистрируемой области в плоскости, перпендикулярной голограмме, м ...	1
Размер регистрируемой области в плоскости, параллельной голограмме, м ...	0,2x0,2
Энергия импульса излучения, Дж, не менее.....	0,5
Диапазон изменения задержки пускового импульса, мкс.....	50... 1000
Длительность импульса излучения, нс, не более.....	40
Габаритные размеры, м	УИГ-1М(М) 4,5x0,82x1,52
	УИГ-12И 3,0x0,8x1,5
	УГМ-1 1,0x0,5x0,35

Разработанный диагностический комплекс для исследования пространственно сложных течений [22] состоит из ЛДА АВС, служащего для формирования и приема сигнала, несущего информацию об объекте, анализа доплеровского сигнала и преобразования его в эффективное значение компонент скорости; автоматизированной системы обработки данных в реальном времени (АС) на базе компьютерной системы, воспринимающей сигнал, пропорциональный мгновенной скорости, ведущей обработку компонент пульсационной скорости, энергии турбулентности, формирующей массив исходных и выходных данных; генератора течений, реализующего исследуемое течение и создающего условия, необходимые для работы лазерного анемометра.

### **3.3.2 Измерение температуры наружной поверхности камеры ЖРДМТ с помощью инфракрасной тепловизионной системы**

Для измерения температуры наружной поверхности камеры ЖРДМТ перспективно использование бесконтактного метода с применением инфракрасной тепловизионной системы. Например, теп-

ловизионная система FLIR SC7700M, использованная при измерении температуры наружной поверхности камеры ЖРДМТ [26], обеспечивает измерение температуры в диапазоне  $(-20 \dots 2500)^\circ\text{C}$ ; точность измерений -  $\pm 1^\circ\text{C}$  (или  $\pm 1\%$ ); температурную чувствительность не менее 18 мК; спектральный диапазон 3 – 5 мкм; разрешение изображения 640x512 / 14 бит; максимальную частоту обновления полных кадров – не менее 100 Гц (с возможностью увеличения до 3000 Гц); время интегрирования – от 3 мкс; сменную оптику с системой фильтров; вход для внешних управляющих сигналов; цифровой выход - USB2, Camlink, GigE; синхронизацию съемки с внешними аналоговыми сигналами; термографический анализ с помощью специального программного обеспечения.

Программные средства осуществляют согласование тепловизора с компьютером, стандартную или специализированную обработку изображений и отображение измерительной информации. Компьютерные программы позволяют проводить анализ термограмм, в частности, изменять основные установки тепловизора (коэффициент излучения, диапазон измерения и т.д.), определять среднюю температуру в областях различной формы, строить профили, изотермы, гистограммы и т.п. Программы дают возможность пользоваться стандартными функциями среды Windows, что делает их гибкими при написании и редактировании всевозможных документов.

Использованная в процессе исследования программа анализа термограмм «Altair» представляет собой программу, предназначенную для обработки изображений, полученных с помощью инфракрасных камер с видеопреобразователями 2D. Благодаря передовым технологиям программа обеспечивает возможность просмотра последовательности изображений в режиме реального времени и сохранения их со скоростью 200 кадров в секунду. В сочетании с другими компонентами программного обеспечения она может использоваться для управления режимом съемки и последующей обработки изображения.

Термограмма записи температуры наружной поверхности камеры ЖРДМТ одного из пусков двигателя, полученная с помощью тепловизионной системы FLIR SC7700M, показана на рисунке 3.21.

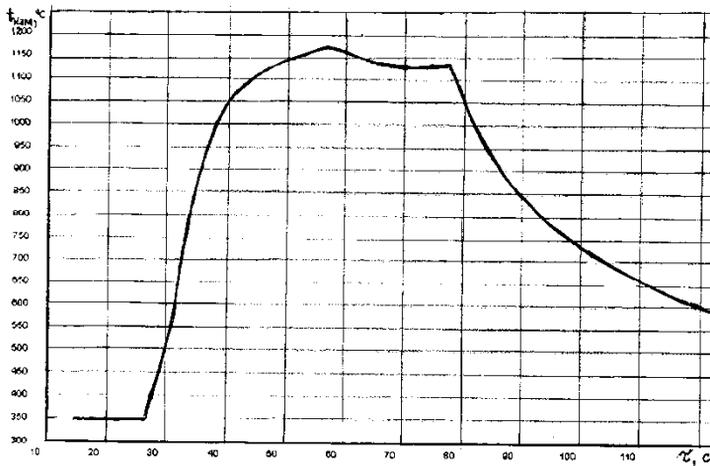


Рисунок 3.21 – Изменение во времени температуры наружной поверхности камеры ЖРДМТ

### 3.3.3 Метод экспериментального определения профилей температуры высокотемпературного газового потока в камере ЖРДМТ

При исследовании рабочих процессов ЖРДМТ необходимо определять профили температуры и состава газовых потоков внутри экспериментальных моделей. Обычно для этой цели используют контактный (с помощью термопар) или оптический (на основе обращения линий щелочных металлов) методы измерения температуры, а также метод отбора проб газового потока с последующим их химическим анализом. Названные методы обладают рядом недостатков, затрудняющих их практическое применение в ЖРДМТ, особенно при сложной конфигурации профилей температуры и состава.

В связи с этим представляется перспективным использовать для экспериментального определения профилей температуры и состава высокотемпературного газового потока в ЖРДМТ метод, основанный на явлении уменьшения высоты прямоугольной пластины, изготовленной из термопластичного полимера и помещенной в исследуемый поток [27]. Основными достоинствами такого метода явля-

ются простота, оперативность и надежность получения информации о параметрах высокотемпературного потока в заданном сечении.

На рисунке 3.22 представлена схема экспериментальной установки, реализующей указанный выше метод. Основными элементами установки являются модельный ЖРДМТ с форсуночной головкой 1, сменной цилиндрической камерой сгорания 2 и соплом 3; система подачи топлива 4; система отбора проб из пристеночного слоя продуктов сгорания, состоящая из вставки 5, втулки 6, отделяющей пристенок от ядра потока, электроклапана 7, змеевика для охлаждения пробы 8 и пипетки для отбора пробы 9; система замера температур хромель-алюмелевыми термопарами, для размещения которых используется вставка 11. Для установки в поток продуктов сгорания пластины из полиметилметакрилата 11 применяется вставка 12, взаимозаменяемая со вставками 5 и 10. В процессе экспериментов определялись величины расходного комплекса и коэффициента полноты расходного комплекса, характеризующие полноту сгорания топлива. Эксперименты проводились при различной приведенной длине камеры сгорания, которая, как известно, характеризует время пребывания и полноту сгорания топлива в газогенераторе.

При приведенной длине камеры сгорания модельного ЖРДМТ порядка 1,5 м обеспечивалось практически полное сгорание топлива.

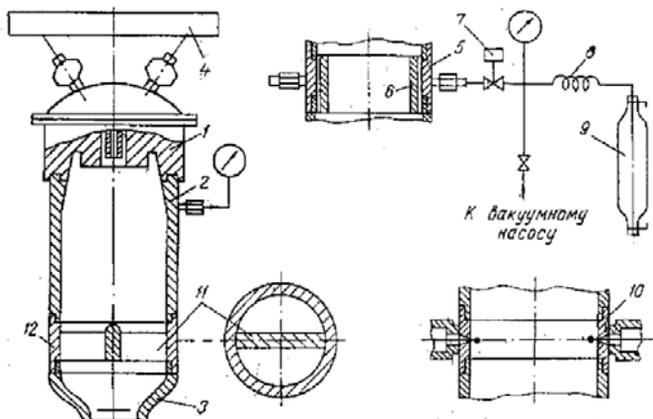


Рисунок 3.22 – Схема экспериментальной установки

В качестве примера на рисунке 3.23, *а* показаны экспериментально определенные профили относительного уменьшения высоты пластин, помещенных в камеры сгорания различных длин, а на рисунке 3.23, *б* – полученные с помощью изложенного метода профили температуры и коэффициента избытка окислителя.

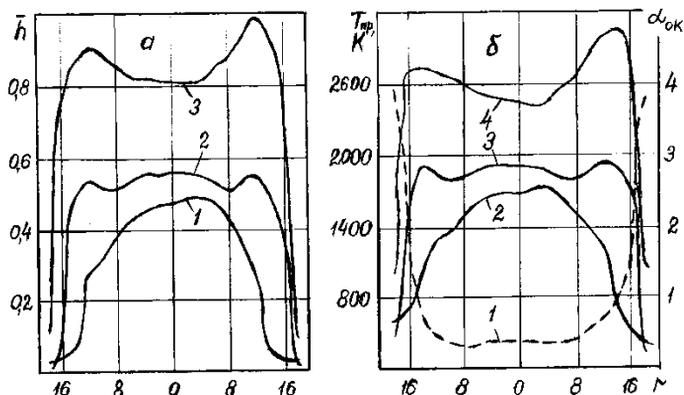


Рисунок 3.23 – Экспериментальные профили величины уменьшения высоты пластин (*а*), температуры  $T_{np}$  и состава продуктов сгорания  $\alpha_{ок}$  (*б*) по радиусу  $r$  (в мм): для *а* – при: 1 -  $L_{np}=0,4$  м; 2 -  $L_{np}=0,6$  м; 3 -  $L_{np}=1,5$  м; для *б* – при: 1 -  $\alpha_{ок}$ ; 2 -  $L_{np}=0,4$  м; 3 -  $L_{np}=0,6$  м; 4 -  $L_{np}=1,5$  м

### 3.4 Методика обработки результатов испытаний

Испытания ЖРДМТ дают большой объем информации по всем измеряемым параметрам. Эта информация может находиться в зашифрованном виде:

- на осциллограммах, термограммах и в протоколах испытаний;
- в памяти ЭВМ, на компакт-диске или флешпамяти при использовании средств автоматизации испытаний;
- в машинных протоколах или распечатках в частично обработанном виде.

Во всех случаях необходима полная обработка результатов испытаний и тщательный анализ этой первичной информации до аттестации двигателя по результатам испытаний.

При испытании ЖРДМТ на непрерывных и импульсных режимах осуществляется измерение следующих параметров:

- тяги двигателя – реактивным силоизмерительным устройством (динамометром) или активным силоизмерительным устройством тензометрического (или индуктивного и другого) типа с регистрацией результатов измерения на светолучевом осциллографе и (или) в памяти ЭВМ;
- давления в камере сгорания – пружинным образцовым манометром с визуальной регистрацией показаний и электрическим датчиком давления (индуктивного, тензометрического, пьезоэлектрического или другого типа) с регистрацией показаний на светолучевом осциллографе и (или) в памяти ЭВМ;
- расходов горючего и окислителя – объемными расходомерами (штихпроберами) с визуальной регистрацией показаний и электрическими датчиками расхода (по перепаду давления столба жидкости, на сужающем устройстве или турбинного и другого типа) с регистрацией показаний на светолучевом осциллографе и (или) в памяти ЭВМ;
- температур горючего и окислителя на входе в двигатель – хромель-копелевыми термопарами с визуальной регистрацией показаний на полуавтоматических потенциометрах или термосопротивлениями с регистрацией показаний на светолучевом осциллографе и (или) в памяти ЭВМ;
- давлений компонентов топлива на входе в двигатель – пружинными образцовыми манометрами с визуальной регистрацией показаний и электрическими датчиками давления (индуктивного, тензометрического или другого типа) с регистрацией показаний на светолучевом осциллографе и (или) в памяти ЭВМ;
- давления окружающей среды – барометром или вакуумметром, если испытания проводятся в барокамере с имитацией условий космического пространства, с визуальной регистрацией показаний или с регистрацией показаний на светолучевом осциллографе и (или) в памяти ЭВМ;
- времени включения двигателя – электрическим секундомером с визуальной регистрацией показаний, отметчиком вре-

мени светолучевого осциллографа на осциллограмме и (или) электронным таймером ЭВМ.

При испытании ЖРДМТ на осциллограмме и (или) в памяти ЭВМ кроме перечисленных выше параметров регистрируются ток и напряжение электропитания, подаваемого на электромагнитные клапаны.

При периодической метрологической аттестации измерительных приборов определяются градуировочные коэффициенты следующих средств измерения:

- ✓ тяги –  $\mu_p$ ;
- ✓ давления в камере сгорания –  $\mu_{p_k}$ ;
- ✓ расходов горючего –  $\mu_{\Gamma}$  и окислителя –  $\mu_{ок}$ .

Известны или измерены до испытания на исследуемом ЖРДМТ площадь минимального сечения сопла  $F_m$  и площадь среза сопла  $F_a$ .

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

- ✓ Тяга ЖРДМТ на земле при давлении окружающей среды  $p_n$

$$P = \mu_p l_p, \quad (3.5)$$

где  $l_p$  – отклонение луча шлейфа тяги на осциллограмме.

- ✓ Тяга ЖРДМТ в пустоте

$$P_n = P + p_n F_a, \quad (3.6)$$

где  $F_a$  – площадь выходного сечения сопла.

- ✓ Давление в камере сгорания ЖРДМТ:

- при измерении пружинным образцовым манометром на непрерывном режиме работы с визуальной регистрацией

$$p_{к.уст.м} = (p_{к.уст.м} K + p_n), \quad (3.7)$$

где  $p_{к.уст.м}$  – избыточное давление в камере сгорания в делениях шкалы манометра,  $K$  – цена деления шкалы манометра;

- при измерении электрическим датчиком давления с регистрацией показаний на светолучевом осциллографе на непрерывном и импульсном режимах работы

$$p_k = \mu_{p_k} l_{p_k} + p_n, \quad (3.8)$$

где  $l_{p_k}$  – отклонение луча шлейфа давления в камере сгорания на осциллограмме,  $\mu_{p_k}$  – градуировочный коэффициенты давления в камере сгорания.

- ✓ Давление горючего и окислителя на входе в двигатель:
  - при измерении пружинным образцовым манометром на непрерывном режиме работы с визуальной регистрацией

$$p_{вхг} = p_{вхг.м} + p_n, \quad (3.9)$$

$$p_{вхок} = p_{вхок.м} + p_n, \quad (3.10)$$

где  $p_{вхг.м}$  и  $p_{вхок.м}$  – избыточные давления подачи горючего и окислителя соответственно, измеренные образцовыми манометрами;

- при измерении электрическим датчиком давления с регистрацией показаний на светолучевом осциллографе на непрерывном и импульсном режимах работы

$$p_{вхг} = \mu_{l_g} l_g + p_n, \quad (3.11)$$

$$p_{вхок} = \mu_{l_{ок}} l_{ок} + p_n, \quad (3.12)$$

где  $l_g$ ,  $l_{ок}$  – отклонение лучей шлейфов давлений горючего и окислителя на входе в двигатель соответственно в камере сгорания на осциллограмме.

- ✓ Масса горючего и окислителя, выработанная ЖРДМТ за одно включение:

$$m_g = \mu_g \Delta l_g \rho_g, \quad (3.13)$$

где  $\mu_g$  – градуировочный коэффициент расходомера-уровнемера горючего,  $\Delta l_g$  – разница уровней горючего по шкале расходомера-уровнемера до и после включения двигателя,  $\rho_g$  – плотность горючего.

$$m_{ок} = \mu_{ок} \Delta l_{ок} \rho_{ок}, \quad (3.14)$$

где  $\mu_{ок}$ ,  $\Delta l_{ок}$  и  $\rho_{ок}$  – те же величины, что и в уравнении (3.13), но относящиеся к окислителю и расходомеру-уровнемеру окислителя.

В качестве примера значения плотности горючего – несимметричного диметилгидрозина  $\rho_{\Gamma}$  и окислителя – азотного тетраоксида  $\rho_{ок}$  в зависимости от температуры в диапазоне от 10 до 35 °С приведены в таблице 3.3.

**Таблица 3.3 – Значения плотности компонентов топлива НДМГ и АТ в зависимости от температуры [11-13]**

$t$	°С	10	12	14	16	18	20	22
$\rho_{\Gamma}$	кг/М <sup>3</sup>	801	798	796	794	793	790	788
$\rho_{ок}$	кг/М <sup>3</sup>	1467	1463	1458	1454	1450	1446	1441
$t$	°С	24	26	28	30	32	35	
$\rho_{\Gamma}$	кг/М <sup>3</sup>	786	784	782	780	778	774	
$\rho_{ок}$	кг/М <sup>3</sup>	1437	1432	1428	1424	1419	1413	

- ✓ Масса топлива, выработанного ЖРДМТ за одно включение

$$m = m_{\Gamma} + m_{ок}. \quad (3.15)$$

- ✓ Средние массовые расходы горючего и окислителя:

$$\dot{m}_{\Gamma} = \frac{m_{\Gamma}}{\tau_{кл}^2}, \quad \dot{m}_{ок} = \frac{m_{ок}}{\tau_{кл}^2}, \quad (3.16), (3.17)$$

где  $\tau_{кл}^2$  – время открытого состояния соответственно клапана горючего и клапана окислителя.

- ✓ Средний массовый расход топлива

$$\dot{m} = \dot{m}_{\Gamma} + \dot{m}_{ок}. \quad (3.18)$$

- ✓ Фактическое (действительное) массовое соотношение компонентов

$$K_m = \frac{\dot{m}_{ок}}{\dot{m}_{\Gamma}}. \quad (3.19)$$

- ✓ Коэффициент избытка окислителя

$$\alpha_{ок} = \frac{K_m}{K_m^o}, \quad (3.20)$$

где  $K_m^o$  – стехиометрическое массовое соотношение компонентов. Для топлива НДМГ и АТ  $K_m^o=3,073$ .

✓ Расходный комплекс

$$\beta = \frac{p_k F_m}{\dot{m}}, \quad (3.21)$$

где  $F_m$  – площадь минимального сечения сопла.

✓ Характеристическая скорость в камере

$$c_* = \frac{p_{o.m} F_m \mu_c}{\dot{m}}, \quad (3.22)$$

где  $p_{o.c}$  – давление торможения в минимальном сечении сопла,  $\mu_c = \dot{m}/\dot{m}_{ид}$  – коэффициент расхода сопла.

Характеристическая скорость в камере и расходный комплекс связаны между собой соотношением

$$c_* = \mu_c \sigma_f \sigma_c \beta, \quad (3.23)$$

где  $\sigma_f = p_{o.c}/p_k$  и  $\sigma_c = p_{o.m}/p_{o.c}$  – коэффициенты восстановления полного давления в камере сгорания и докритической части сопла соответственно.

✓ Удельный импульс тяги ЖРДМТ на земле и в пустоте соответственно

$$I_y = \frac{P}{\dot{m}}, \quad (3.24)$$

$$I_{y.n} = \frac{P_n}{\dot{m}}. \quad (3.25)$$

✓ Тяговый комплекс в пустоте

$$K_{P_n} = \frac{P_n}{p_k F_m} = \frac{I_{y.n}}{\beta}. \quad (3.26)$$

✓ Коэффициент тяги в пустоте

$$K_{T_n} = \frac{P_n}{p_{o.m} F_m \mu_c} = \frac{I_{y.n}}{c_*}. \quad (3.27)$$

Коэффициенты удельного импульса, характеризующие степень совершенства процессов в камере сгорания, сопле и ЖРДМТ:

✓ Коэффициент полноты расходного комплекса

$$\varphi_{\beta} = \frac{\beta}{\beta_{ид}}, \quad (3.28)$$

где  $\beta_{ид}$  – идеальный расходный комплекс, определяемый термодинамическим расчетом.

Значения идеальных удельных параметров (расходного комплекса, тягового комплекса, удельного импульса тяги), вычисленных в результате термодинамического расчета, при полученном в эксперименте коэффициенте избытка окислителя могут быть взяты из таблицы 3.4.

Таблица 3.4 – Данные термодинамического расчета для топлива НДМГ и АТ [21]

$\alpha_{ок}$	-	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
$\beta_{ид}$	Нс/кг	1360	1490	1625	1690	1730	1736
$K_{P_n}$	-	2,01	1,93	1,85	1,85	1,87	1,91
$I_{у.п.ид}$	Нс/кг	2710	2820	2990	3150	3260	3340
$\alpha_{ок}$	-	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	
$\beta_{ид}$	Нс/кг	1730	1710	1680	1645	1610	
$K_{P_n}$	-	1,96	2,01	2,03	2,02	2,01	
$I_{у.п.ид}$	Нс/кг	3380	3380	3360	3300	3210	

✓ Коэффициент камеры сгорания

$$\varphi_{\kappa} = \frac{c}{c_{*ид}}, \quad (3.29)$$

где  $c_{*ид}$  – идеальная характеристическая скорость в камере, определяемая термодинамическим расчетом.

Взаимосвязь между коэффициентами  $\varphi_{\beta}$  и  $\varphi_{\kappa}$  определяется соотношением

$$\varphi_{\kappa} = \mu_c \sigma_f \sigma_c \varphi_{\beta}. \quad (3.30)$$

✓ Коэффициент полноты тягового комплекса

$$\varphi_{K_P} = \frac{K_{P_n}}{K_{P_n,ид}}, \quad (3.31)$$

где  $K_{P_n,уд}$  – идеальный тяговый комплекс в пустоте, получаемый термодинамическим расчетом.

- ✓ Коэффициент сопла

$$\varphi_c = \frac{K_{T_n}}{K_{T_n,уд}}, \quad (3.32)$$

где  $K_{T_n,уд}$  – идеальный коэффициент тяги в пустоте, получаемый термодинамическим расчетом ( $K_{T_n,уд} = K_{P_n,уд}$ ).

- ✓ Коэффициент удельного импульса тяги ЖРДМТ

$$\varphi_I = \frac{I_{y,n}}{I_{y,n,уд}} = \varphi_\kappa \varphi_c = \varphi_\beta \varphi_{K_p}. \quad (3.33)$$

Значения параметров ЖРДМТ на импульсных режимах с использованием результатов измерений определяются следующим образом:

- ✓ Временные динамические параметры ЖРДМТ определяются с помощью осциллограммы идентично по следующему общему алгоритму:

$$\tau = \mu_\tau l, \quad (3.34)$$

где  $\mu_\tau$  – масштабный коэффициент времени, имеющий для каждой осциллограммы свое значение;  $l$  – длина отрезка на осциллограмме, соответствующая определяемому временно-му динамическому параметру.

Масштабный коэффициент времени  $\mu_\tau$  получается путем деления некоторого определенного интервала времени, отсчитанного по отметкам времени, к линейному размеру, занимаемому этим интервалом на осциллограмме.

- ✓ Масса горючего и окислителя, выработанные ЖРДМТ за одно короткое включение в серии включений одной длительности:

$$m_\Gamma = \mu_\Gamma \Delta l_\Gamma \rho_\Gamma / n, \quad (3.35)$$

$$m_{ок} = \mu_{ок} \Delta l_{ок} \rho_{ок} / n, \quad (3.36)$$

где  $n$  – количество включений двигателя в серии одной длительности.

- ✓ Расходный комплекс в импульсном режиме

$$\beta_u = \frac{F_M \int_0^{\tau_{\text{вк}} + \tau_{\text{нд}}} p_{\kappa} d\tau}{\int_0^{\tau_{\text{вк}} + \tau_{\text{нд}}} \dot{m}_{\Gamma} d\tau + \int_0^{\tau_{\text{вк}} + \tau_{\text{нд}}} \dot{m}_{\text{ок}} d\tau} = \frac{F_M \int_0^{\tau_{\text{вк}} + \tau_{\text{нд}}} p_{\kappa} d\tau}{\int_0^{\tau_{\text{вк}} + \tau_{\text{нд}}} \dot{m} d\tau} = \frac{F_M S \mu_{p_{\kappa}} \mu_{\tau}}{m}, \quad (3.37)$$

где  $m = m_{\Gamma} + m_{\text{ок}}$  – масса топлива, выработанного двигателем за одно включение;  $\tau_{\text{вк}}$  – время включения двигателя;  $\tau_{\text{нд}}$  – время останова двигателя;  $S$  – геометрическая площадь под графиком зависимости давления в камере сгорания ЖРДМТ по времени  $p_{\kappa} = f(\tau)$  на осциллограмме или на мониторе компьютера за одно включение двигателя в период времени от 0 до  $(\tau_{\text{вк}} + \tau_{\text{нд}})$ .

✓ Удельный импульс тяги в пустоте:

$$I_{y.n.u} = \frac{\int_0^{\tau_{\text{вк}} + \tau_{\text{нд}}} P_n d\tau}{\int_0^{\tau_{\text{вк}} + \tau_{\text{нд}}} \dot{m} d\tau} = \frac{S_P \mu_P \mu_{\tau}}{m} \quad (3.38)$$

или 
$$I_{y.n.u} = K_{P_n.u} \beta_u, \quad (3.39)$$

где  $S_P$  – геометрическая площадь под графиком зависимости тяги в пустоте по времени  $P_n = f(\tau)$  на осциллограмме или на мониторе компьютера за одно включение двигателя в период времени от 0 до  $(\tau_{\text{вк}} + \tau_{\text{нд}})$ ;  $K_{P_n.u}$  – тяговый комплекс в пустоте в импульсном режиме.

✓ Импульс тяги, создаваемый ЖРДМТ за одно включение:

$$I_u = \int_0^{\tau_{\text{вк}} + \tau_{\text{нд}}} P_n d\tau = K_{P_n} F_M \int_0^{\tau_{\text{вк}} + \tau_{\text{нд}}} p_{\kappa} d\tau = K_{P_n} F_M S_{p_{\kappa}}. \quad (3.40)$$

✓ Коэффициент полноты расходного комплекса в импульсном режиме:

$$\varphi_{\beta_u} = \frac{\beta_u}{\beta_{u0}}, \quad (3.41)$$

где  $\beta_{ид}$  – идеальный расходный комплекс, полученный термодинамическим расчетом.

Значение идеального расходного комплекса при полученном в эксперименте коэффициенте избытка окислителя для топлива НДМГ и АТ может быть взято из таблицы 3.4 – результатов термодинамического расчета для топлива НДМГ и АТ.

- ✓ Коэффициент полноты тягового комплекса в пустоте на импульсном режиме

$$\varphi_{K_{P_n.u}} = \frac{K_{P_n.u}}{K_{P_n.ид}}, \quad (3.42)$$

где  $K_{P_n.ид}$  – идеальный тяговый комплекс в пустоте, полученный термодинамическим расчетом.

- ✓ Коэффициент удельного импульса тяги в импульсном режиме

$$\varphi_{I.u} = \varphi_{\beta.u} \varphi_{K_{P_n.u}}. \quad (3.43)$$

### 3.5 Экспериментальные статические и динамические характеристики ЖРДМТ и их анализ

В разделе изложены основы методики проведения и получения экспериментальных характеристик ЖРДМТ и их сравнительный анализ с теоретическими характеристиками [9].

#### 3.5.1 Статическая характеристика ЖРДМТ по составу топлива

Экспериментальная характеристика ЖРДМТ по составу топлива может быть получена на высотном огневом стенде, разрежение в вакуумной камере которого обеспечивает безотрывное течение продуктов сгорания в сопле.

Для получения характеристики по составу топлива проводятся не менее 5 огневых пусков ЖРДМТ продолжительностью 1...5 с. Изменение коэффициента избытка окислителя  $\alpha_{ок}$  обеспечивается

варьированием давлений компонентов топлива на входе в двигатель  $P_{\text{вхг}}$  и  $P_{\text{вхок}}$  от номинального значения. При этом заранее подбираются значения давлений  $P_{\text{вхг}}$  и  $P_{\text{вхок}}$ , обеспечивающие в заданном диапазоне примерное равенство давления в камере сгорания  $p_k$  (тяги) на каждом пуске.

В процессе испытаний с помощью методов, описанных в разделе 3.2 данного пособия, на каждом режиме производится измерение тяги, расходов компонентов топлива, давления в камере сгорания, давления в вакуумной камере, продолжительности включения двигателя. При обработке результатов эксперимента значения параметров двигателя приводятся к пустотным условиям.

В случае отклонения давления  $p_k$  от значения, полученного при номинальном коэффициенте избытка окислителя  $\alpha_{\text{ок}}$ , для определения зависимости  $P_n = f(\alpha_{\text{ок}})$  необходимо экспериментальное значение пустотной тяги  $P'_n$  на данном режиме скорректировать согласно выражению  $P_n = P'_n \frac{p_k}{p'_k}$ , где штрих обозначает параметр, полученный при отклонении давления в камере сгорания  $p_k$  от номинального значения.

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

Сравним идеальную и реальную характеристику ЖРДМТ по составу топлива.

Вид зависимости удельного импульса тяги в пустоте от коэффициента избытка окислителя  $I_{y.n} = f(\alpha_{\text{ок}})$  индивидуален для каждого типа двигателя.

Для ЖРДМТ характерно существенное (по сравнению с идеальным случаем) уменьшение значения действительного удельного импульса тяги, что обусловлено снижением эффективности процессов как в камере сгорания, так и в сопле. При этом коэффициент камеры сгорания может изменяться в весьма широких пределах:  $\varphi_k = (0,70...$

0,95); возможный диапазон изменения коэффициента сопла более узок —  $\varphi_c = (0,85 \dots 0,97)$ . С уменьшением размерности ЖРДМТ значения коэффициентов  $\varphi_k$  и  $\varphi_c$  обычно снижаются.

Показатели эффективности процессов в камере ( $\varphi_k$ ,  $\varphi_c$ ) у ЖРДМТ значительно ниже, чем у ЖРД больших тяг. Причиной снижения коэффициента  $\varphi_k$  являются, прежде всего, крупномасштабная неравномерность соотношения компонентов в поперечном сечении камеры, а также относительно низкая полнота сгорания топлива из-за малого времени пребывания продуктов неполного сгорания в камере сгорания. Необходимо отметить, что при отклонении коэффициента  $\alpha_{ок}$  от номинального значения коэффициент  $\varphi_k$  обычно несколько уменьшается из-за изменения условий смесеобразования компонентов, в частности для самовоспламеняющихся жидких компонентов топлива из-за изменения эффективности процесса 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 сопел ЖРДМТ. При этом вид зависимости  $K_{P_n} = f(\alpha_{ок})$  может резко отличаться от идеального случая из-за несоответствия реального состава рабочего тела на входе в сопло составу, принимаемому в термодинамическом расчете.

В то же время в ЖРДМТ имеются возможности увеличения  $I_{y.n}$ , 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  $\varphi_c$  возможно при выборе оптимальной геометрической степени расширения сопла  $\bar{F}_a$ .

Зависимость  $P_n = f(\alpha_{ок})$ , полученная в эксперименте, обычно гораздо меньше отличается от идеальной, чем соответствующая зависимость для удельного импульса. Это объясняется отсутствием влияния полноты тепловыделения в камере сгорания ( $\varphi_k$ ) на тягу

при данном давлении  $p_k$ . Разница между идеальными и реальными значениями тяг ЖРДМТ обусловлена только влиянием коэффициентов  $\varphi_c = f(\alpha_{ок})$  и  $\mu_c < 1,0$ .

### 3.5.2 Статические дроссельная и высотная характеристики ЖРДМТ

Дроссельная характеристика ЖРДМТ может быть получена экспериментально как на высотном, так и на наземном огневом стенде. Проведение наземных испытаний гораздо проще и требует 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  $\bar{F}_a$ , что обеспечивает безотрывное течение продуктов сгорания.

Для снятия дроссельной характеристики ЖРДМТ выполняется не менее 5 огневых пусков двигателя продолжительностью (1...5) с при различных расходах топлива в заданном диапазоне изменения тяги. Удобнее проводить пуски при одинаковых в обеих магистралях давлениях компонентов на входе в двигатель ( $p_{вхг} = p_{вхок}$ ). При этом требуемое соотношение компонентов обеспечивается предварительной настройкой двигателя.

В процессе испытаний с помощью методов, описанных в разделе 3.2, измеряются тяга, расходы и температура компонентов топлива, 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).

Экспериментальное определение характеристик ЖРДМТ с соплом, имеющим обычную для таких двигателей степень расширения ( $\bar{F}_a = 40 \dots 200$ ), необходимо выполнять на высотном стенде. Методика проведения таких испытаний аналогична описанной выше.

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

Расчет теоретической дроссельной характеристики конкретного двигателя осуществляется 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 (2.19) и (2.20) можно вычислить значения постоянных  $A$ ,  $B$  и  $C$ . 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 рисунке 3.24.

Из рисунка 3.24 видно, что экспериментальные значения удельного импульса существенно меньше расчетных, особенно в области низких значений давления  $p_k$ . При изменении секундного расхода топлива 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, например, для самовоспламеняющихся компонентов топлива, к ухудшению процессов смешения компонентов топлива в жидкой фазе. Кроме того, низкое давление, характерное для камер сгорания ЖРДМТ, отрицательно сказывается на скорости химических процессов, опре-

деляющих процесс преобразования топлива на начальных низкотемпературных его стадиях.

Однако, несмотря на различия в удельном импульсе тяги, расчетные и эмпирические зависимости тяги от давления  $p_k$  совпадают (рисунок 3.24, а).

Учитывая, что при дросселировании  $K_{P_n} \cong \text{const}$ , получаем, что тяга прямо пропорциональна давлению в камере сгорания 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  $p_k$ .

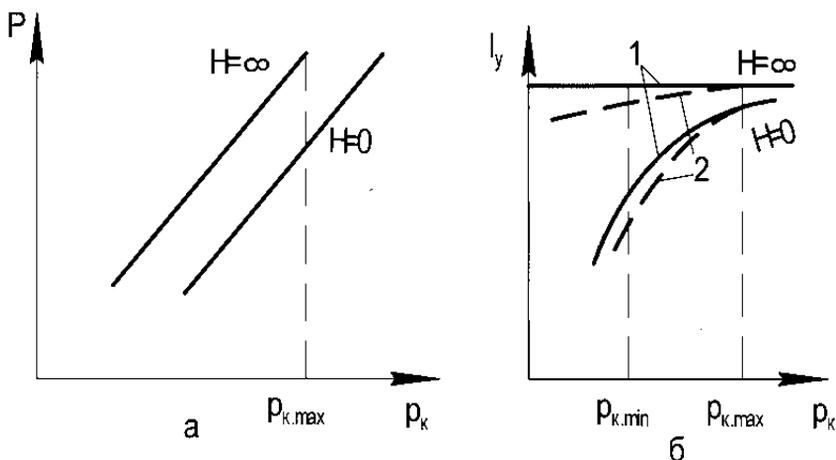


Рисунок 3.24 – Сравнение экспериментальной и теоретической дроссельных характеристик: а – изменение тяги; б – изменение удельного импульса; 1 – теоретическая характеристика; 2 – экспериментальная характеристика

Если же построить зависимости тяги от расхода топлива или давления компонентов на входе в двигатель ( $p_{вхг} = p_{вхок}$ ), 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 опре-

деления высотной характеристики двигателя (при безотрывном течении газа в сопле,  $\dot{m} = \text{const}$  и  $\alpha_{ок} = \text{const}$ ) достаточно иметь эмпирические данные только при одной высоте полета (при одном значении давления окружающей среды).

Пример дроссельной характеристики двухкомпонентного ЖРДМТ 11Д428АФ-16 разработки и производства ФГУП НИИМАШ, работающего на компонентах топлива НДМГ и АТИН и имеющего номинальную тягу 123,5 Н, показан на рисунке 3.25 [14]. Дроссельная характеристика представлена в виде зависимости тяги в пустоте от входного давления компонентов топлива в двигатель.

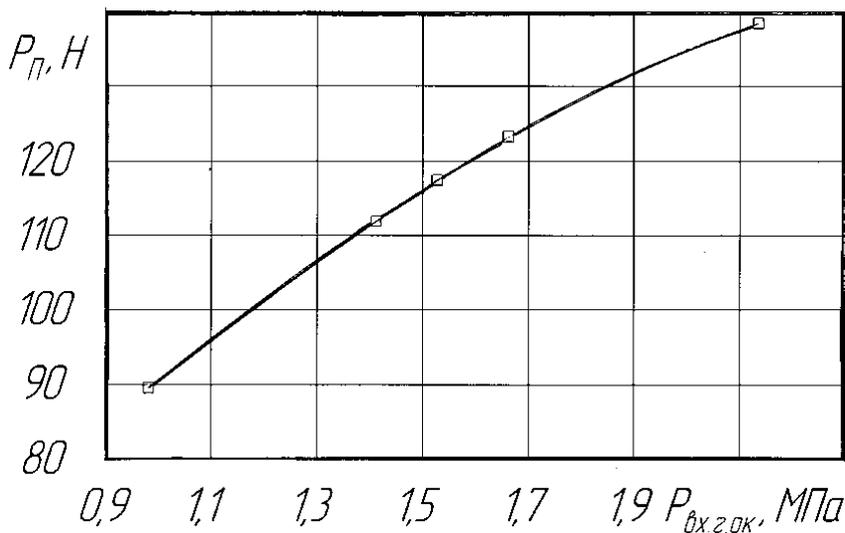


Рисунок 3.25 – Зависимость тяги в пустоте ЖРДМТ 11Д428АФ-16 от входного давления

Другие основные технические параметры данного двигателя приведены в таблице 3.5.

**Таблица 3.5 – Основные технические параметры ЖРДМТ 11Д428АФ–16 [14]**

Компонент, горючее/окислитель	НДМГ/АТИН
Соотношение компонентов	1,85±0,05
Номинальная тяга, Н	123,5
Удельный импульс тяги на непрерывном режиме, м/с	3002
Номинальное давление на входе, МПа	1,47
Максимальное давление на входе, МПа	1,57
Минимальное давление на входе, МПа	1,37
Минимальный импульс за включение, Н·с	2,45
Время включения, с	0,030...2000
Максимальная длина, мм	372
Максимальная масса, кг	1,9
Максимальный диаметр сопла, мм	157,4
Геометрическая степень расширения сопла	157
Ресурс по времени включений, с	50 000
Количество включений	500 000
Рабочее напряжение, В	27

### **3.5.3 Динамические характеристики ЖРДМТ в импульсном режиме работы**

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

Интервалы времени, характеризующие динамические свойства двигателя (см. рисунок 2.5) определяются с помощью автоматизированной системы сбора и обработки экспериментальных данных (см. раздел 3.2.4).

Значения времени  $\tau_{о.к}$  и  $\tau_{з.к}$  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 и параметров форсунок и т. д.

Задержка воспламенения  $\tau_{зв}$  ухудшает не только динамические показатели камеры сгорания и двигателя, но и снижает экономичность ЖРДМТ. Поэтому уменьшение  $\tau_{зв}$  является одной из главных задач экспериментальной доводки ЖРДМТ. Для двухкомпонентных ЖРДМТ на самовоспламеняющихся компонентах топлива значение  $\tau_{зв}$  определяется, прежде всего, эффективностью процесса организации жидкофазного смешения компонентов топлива.

Время включения ЖРДМТ  $\tau_{БК}$  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  $\tau_{БК}$  представляет регулировочную характеристику ЖРДМТ, причем время  $\tau_{БК}$  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.

В качестве примера характеристик в импульсном режиме работы на рисунках 3.26 и 3.27 показаны соответственно зависимости импульса тяги и удельного импульса тяги ЖРДМТ 11Д428АФ-16 от длительности электрической команды [14].

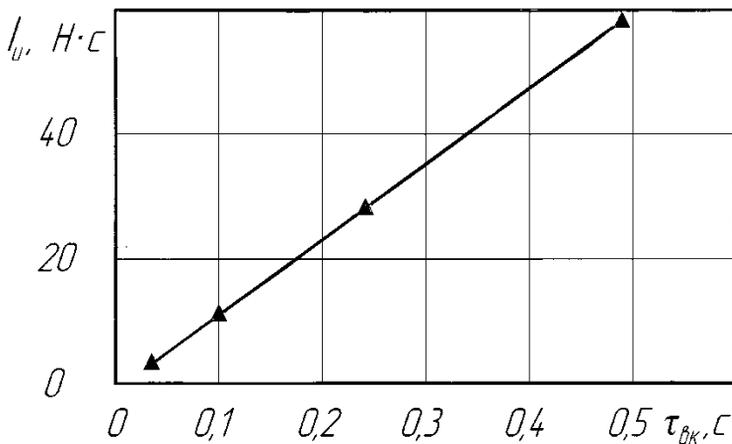


Рисунок 3.26 – Зависимость импульса тяги ЖРДМТ 11Д428АФ-16 от длительности электрической команды  $\tau_{вк}$

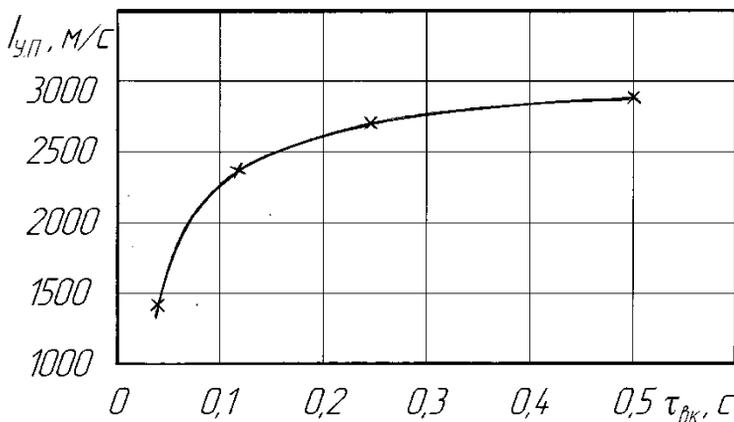


Рисунок 3.27 – Зависимость удельного импульса тяги ЖРДМТ 11Д428АФ-16 от времени включения  $\tau_{вк}$

## Библиографический список

1. Алемасов, В.Е. Теория ракетных двигателей [Текст]: учеб. для студентов вузов / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин; под ред. В.П. Глушко.– М.: Машиностроение, 1989.– 464 с.
2. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей [Текст]: учеб. для студентов по специальности «Авиационные двигатели и энергетические установки» / Г.Г. Гахун, В.И. Баулин, В.А. Володин [и др.]; под общ. ред. Г.Г. Гахуна.– М.: Машиностроение, 1978, 1989.– 424 с.
3. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей [Текст]: учеб. для авиац. спец. вузов. В 2 кн. / А.П. Васильев, В.М. Кудрявцев, В.А. Кузнецов [и др.]; под ред. В.М. Кудрявцева. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Вышш. шк, 1993.
4. Ракетные двигатели [Текст] / Т.М. Мелькумов, Н.И. Мелик-Пашаев, П.Г. Чистяков [и др.].– М.: Машиностроение, 1976. – 399 с.
5. Беляев, Е.Н. Математическое моделирование рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей [Текст]: учеб. / Е.Н. Беляев, В.К. Чванов, В.В. Черваков; под ред. В.К. Чванова. – М.: МАИ, 1999. – 228 с.
6. Добровольский, М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования [Текст]: учеб. для вузов / М.В. Добровольский; под ред. Д.А. Ягодникова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 448 с.
7. Салич, В.Л. Жидкостные ракетные двигатели малой тяги [Текст]: учеб. пособие / В.Л. Салич, А.А. Шмаков, С.Д. Ваулин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 52 с.
8. Дорوفеев, А.А. Основы теории тепловых ракетных двигателей. Теория, расчёт и проектирование [Текст]: учеб. для авиа- и ракетостроительных специальностей вузов / А.А. Дорوفеев. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 463 с.
9. Заботин, В.Г. Характеристики ЖРД [Текст]: учеб. пособие / В.Г. Заботин, В.С. Кондрусев, В.Е. Нигодюк. – Куйбышев: КуАИ, 1981. – 91 с.
10. Жуковский, А.Е. Испытания жидкостных ракетных двигателей [Текст]: учеб. для студентов авиационных специальностей вузов / А.Е. Жуковский, В.С. Кондрусев, В.В. Окорочков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 352 с.
11. Штехер, М.С. Топлива и рабочие тела ракетных двигателей [Текст] / М.С. Штехер. – М.: Машиностроение, 1976. – 301 с.
12. Егорычев, В.С. Топлива химических ракетных двигателей [Текст]: учеб. пособие / В.С. Егорычев, В.С. Кондрусев. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007.– 72 с.
13. Пат. 2163685 РФ, МПК F02K9/68. Способ организации рабочего процесса жидкостного ракетного двигателя и ЖРД для его осуществления [Текст] / В.Н. Виноградов, Н.А. Масленников, Б.Е. Диденко [и др.]; патентообладатель – Опытное конструкторское бюро "Факел". – № 99108936/06; заявл. 27.04.1999; опубл. 27.02.2001.
14. Ракетные двигатели малой тяги: каталог продукции НИИМАШ/ ФГУП «Научно-исследовательский институт машиностроения». – Нижняя Салда: НИИМАШ, 2010. – 27 с.

15. Пат. 2192555 РФ, МПК F02K9/62, F02K9/52. Камера жидкостного ракетного двигателя малой тяги [Текст] / Ф.А. Казанкин, Р.Х. Кутуев, Е.Г. Ларин, П.Б. Мезенин; патентообладатель - Научно-исследовательский институт машиностроения. – № 2000116492/06; заявл. 22.06.2000; опубл. 10.11.2002.

16. Дубинкин, Ю.М. Проблемы организации рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей малой тяги [Текст] / Ю.М. Дубинкин, В.Е. Нигодюк // Изв. вузов. Авиационная техника. – 1993. – № 2. – С. 71-74.

17. Нигодюк, В.Е. Исследование закономерностей жидкофазного взаимодействия компонентов СЖРТ [Текст]/В.Е. Нигодюк, А.В. Сулинов// Вестн. СГАУ. – 2009. – № 3 (19), Ч. 3. – С. 316-321.

18. Нигодюк, В.Е. Пути совершенствования рабочего процесса ЖРДМТ на самовоспламеняющихся компонентах топлива [Текст]/В.Е. Нигодюк, А.В. Сулинов// Вестн. СГАУ. – 2012. – № 3 (34), Ч. 3. – С. 103-107.

19. Агеенко, Ю.И. Исследование параметров смесеобразования и методический подход к расчетам и проектированию ЖРДМТ со струйно-центробежной схемой смещения компонентов АТ и НДМГ на стенке камеры сгорания [Текст] / Ю.И. Агеенко // Вестн. СГАУ. – 2009. – № 3 (19). Ч.2. – С.171-177.

20. Агеенко, Ю.И. Исследование возможности создания ЖРДМТ тягой 400 Н по дефлекторно-центробежной схеме смесеобразования компонентов топлива АТ и НДМГ [Текст] / Ю.И. Агеенко, Р.В. Ильин, И.В. Пегин, Е.А. Шаламов // Вестник СГАУ. -2012. - № 3 (34). Ч.1. - С.71 - 76.

21. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания [Текст]: справ. В 10 т. / под ред. акад. В.П. Глушко. – М.: ВИНТИ АН СССР, 1971–1979.

22. Экспериментальный комплекс «Научно-исследовательского центра космической энергетики» [Текст] // Научно-исследовательский центр космической энергетики. – Самара: Изд-во СГАУ, 2008. – 66 с.

23. Заботин, В.Г. Теплофизические измерения в двигателях летательных аппаратов [Текст]: учеб. пособие / В.Г. Заботин, А.Н. Первышин. – Куйбышев: КуАИ, 1990. – 67 с.

24. Автоматизированная система управления и информационного обеспечения исследований жидкостных ракетных двигателей малой тяги [Текст]/ В.В. Рыжков, Ю.С. Ивашин, А.Ю. Ивашин [и др.] // Вестн. СГАУ. Спец. вып. – 2003. – Ч. 2. – С. 39-44.

25. Теория и техника теплофизического эксперимента [Текст]: учеб. пособие для вузов / Ю.Ф. Гортышев, Ф.Н. Дресвянников, Н.С. Идиатуллин [и др.]; под ред. В.К. Щукина. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 360 с.

26. Исследование влияния теплового потока от маршевого ЖРД на параметры управляющих ЖРДМТ в условиях двигательной установки перспективного разгонного блока [Текст] / Ю.И. Агеенко, Р.Н. Гальперин, Ю.С. Ивашин [и др.] // Вестн. СГАУ. – 2012. – № 3 (34). Ч. 3. – С. 268-276.

27. Метод экспериментального определения профилей температуры и состава высокотемпературного газового потока [Текст] / В.Е. Годлевский, В.Н. Градов, В.Я. Левин [и др.] // Инженерно-физический журнал. – Том XXXVIII, № 5. – С. 853-858.

Учебное издание

*Егорычев Виталий Сергеевич,  
Сулинов Александр Васильевич*

**ЖИДКОСТНЫЕ РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ МАЛОЙ ТЯГИ  
И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

*Учебное пособие*

Редакторская обработка Н.С. Куприянова  
Доверстка Т.Е. Половнева

Подписано в печать 07.04.2014. Формат 60×84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 8,0.  
Тираж 100 экз. Заказ . Арт. 9/2014.

Самарский государственный  
аэрокосмический университет  
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

---

Изд-во Самарского государственного  
аэрокосмического университета.  
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

