

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА
(национальный исследовательский университет)»

**Экспериментальная динамическая
характеристика ЖРДМТ по времени
включения**

Электронные методические указания к лабораторной работе

Самара
2010

УДК 629.7.036.54-66 (077)
ББК 39.65

Составитель: Егорычев Виталий Сергеевич

Рецензенты: главный конструктор ПФ ОАО «НПО
ЭНЕРГОМАШ им. академика
В.П. Глушко» И.А. Ганин,
канд. техн. наук, доц. В.А. Борисов

Приведены общие сведения о характеристика ЖРДМТ, рассмотрены построение и характер протекания теоретической динамической характеристики ЖРДМТ по времени включения. Составлена методика проведения огневых стендовых испытаний ЖРДМТ и обработки результатов эксперимента. Методические указания позволяют студентам самостоятельно подготовиться к лабораторной работе, выполнить её и провести анализ полученных результатов эксперимента.

Указания снабжены необходимыми иллюстративными и справочными материалами.

Предназначены для магистров факультета двигателей летательных аппаратов, обучающихся по направлению 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов».

Выполнены на кафедре теории двигателей летательных аппаратов в рамках магистерской программы «Энергетика, экология и двигательные установки ракетных и космических систем».

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2010

О Г Л А В Л Е Н И Е

Основные сокращения, условные обозначения и индексы.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.....	7
2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ ЖРДМТ.....	7
3. ХАРАКТЕРИСТИКА ЖРДМТ ПО ВРЕМЕНИ ВКЛЮЧЕНИЯ.....	9
4. ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЯ.....	14
5. СТЕНД ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ И ИЗМЕРЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ.....	15
6. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА.....	17
7. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА.....	18
9. ЗАДАНИЕ.....	23
10. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ ПО РАБОТЕ.....	23
11. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	25
Библиографический список.....	26
Приложение.....	27

Основные сокращения, условные обозначения и индексы

С о к р а щ е н и я

ДУ – двигательная установка;
ЖРДМТ – жидкостный ракетный двигатель малой тяги;
КС – камера сгорания;
РТ – рабочее тело;

У с л о в н ы е о б о з н а ч е н и я

F – площадь;

f – удельная площадь;

\bar{F} – относительная площадь сечения камеры;

I_y – удельный импульс тяги;

L, l – длина;

m – масса;

\dot{m} – массовый расход;

P – тяга;

p – давление;

R_o, R – универсальная и удельная газовые постоянные соответственно;

T – температура;

φ_1 – коэффициент удельного импульса;

φ_k – коэффициент камеры сгорания;

φ_c – коэффициент сопла;

β – расходный комплекс;

ε – степень расширения рабочего тела в сопле;

ρ – плотность;

τ – время;

И н д е к с ы

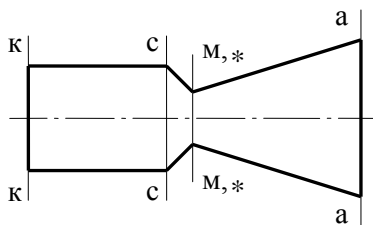
a – выход из сопла;

вх – вход;

вых – выход;
к – камера или вход в камеру;
н – атмосферный;
о – параметр торможения;
п – в пустоте;
р – расчетный;
с – вход в сопло;
ср – среднее значение;
ст – стенка;
ид – идеальный, теоретический;

Сечения камеры

к – вход в камеру;
с – вход в сопло;
м – минимальное сечение сопла;
* – критическое сечение сопла;
а – выход из сопла;



ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемые методические указания необходимы студентам для самостоятельной подготовки к лабораторной работе по учебной дисциплине «Двигательные установки и энергетика космических аппаратов», её качественного проведения, обработки, анализа и представления результатов испытаний ЖРДМТ, а также сдачи зачета по работе. Оно посвящено проведению огневых стендовых испытаний жидкостного ракетного двигателя малой тяги (ЖРДМТ) с целью получения его экспериментальной динамической характеристики по времени включения.

Необходимость написания настоящих методических указаний продиктована тем, что в известной на сегодняшний день учебной литературе по ЖРДМТ практически отсутствуют методики экспериментального получения статических и динамических характеристик и параметров экономичности, по которым оценивается степень совершенства разрабатываемого двигателя, его конкурентоспособность на мировом рынке.

Приведены краткие сведения о статических и динамических характеристиках ЖРДМТ, получен характер протекания теоретической динамической характеристики по времени включения.

Руководствуясь стремлением реализовать в процессе подготовки будущих специалистов инновационные технологии, автор обобщил в настоящих указаниях опыт подготовки и проведения огневых испытаний ЖРДМТ в условиях, приближенных к космическим, определения требуемой характеристики в и импульсном режиме, обработки экспериментальных данных и анализа полученных результатов.

1. ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Цель работы - закрепить теоретические знания по ЖРДМТ и их характеристикам, получить практические навыки проведения стендовых огневых испытаний ЖРДМТ и обработки результатов эксперимента, научиться проводить анализ экспериментальных характеристик и параметров ракетного двигателя.

Для достижения этой цели необходимо:

- изучить данные методические указания, рекомендуемую в них литературу и лекции, относящиеся к теме работы;
- ознакомиться с устройством испытуемого ЖРДМТ и принципом его работы;
- изучить методику проведения испытаний и обработки результатов эксперимента;
- провести стендовые огневые испытания ЖРДМТ;
- обработать результаты эксперимента;
- построить экспериментальную динамическую характеристику ЖРДМТ по времени включения двигателя;
- проанализировать экспериментальные динамические параметры ЖРДМТ и протекание экспериментальной динамической характеристики по длительности включения;
- оценить степень совершенства рабочего процесса ЖРДМТ в импульсном режиме работы.

2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ 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 плотности, 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 тоже самое, высота полета (орбиты);
- длительность включения двигателя;
- порядковый номер следования импульса;
- частота следования импульсов.

Наибольший практический интерес представляют три статические характеристики ЖРДМТ:

- ✓ *дроссельная;*
- ✓ *высотная;*
- ✓ *по составу топлива.*

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

На практике наиболее востребованы следующие три динамические характеристики ЖРДМТ:

- *по длительности включения;*
- *частоте включения;*
- *порядковому номеру следования включения двигателя в серии.*

Эти характеристики в значительной степени определяют экономичность работы ЖРДМТ в качестве исполнительных органов системы управления космическими аппаратами и эффективность работы системы управления.

3. ХАРАКТЕРИСТИКА ЖРДМТ ПО ВРЕМЕНИ ВКЛЮЧЕНИЯ

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

$$I_u, I_{y.u} = f(\tau_{\text{вк}}) \text{ при } p_{\text{к.н}}, K_{m.n} = \text{const}. \quad (1)$$

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, заноситься 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 $\tau_{\text{вк}}$ 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 $I_{y.u} = f(\tau_{\text{вк}})$ используется для аттестации двигателя, прошедшего доводку и принятого к эксплуатации в системе управления положением КА в пространстве. Иногда эту характеристику строят не от времени включения $\tau_{\text{вк}}$, а от времени открытого состояния топливных клапанов $\tau_{\text{кл}}$. Эти времена однозначно связаны между собой. Характеристику $I_{y.u} = f(\tau_{\text{кл}})$ 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 непрерывного к импульсным режимам 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 $\tau_{3.6}$ (см. рис. 1).

Проведем теоретическую оценку влияния $\tau_{3.6}$ на экономичность ЖРДМТ. Она может быть выполнена в предположении постоянства давлений обоих компонентов топлива на входе в двигатель на протяжении всего времени включения ЖРДМТ $\tau_{вк}$.

Используя уравнение массового расхода жидкого компонента через форсунки смесительной головки

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

где Δp_ϕ – перепад давления на форсунках окислителя или горючего, для работы двигателя на непрерывном режиме, можно записать:

$$\dot{m}_\phi = \mu_\phi F_\phi \sqrt{2\rho(p_{вх} - p_{к.н})}, \quad (3)$$

где $p_{вх}$ 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 рис. 1 диаграмму работы ЖРДМТ в режиме короткого единичного включения при различных длительностях включения двигателя $\tau_{вк}$.

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:

$$\dot{m}_{3.6} = \mu_\phi F_\phi \sqrt{2\rho p_{вх}}. \quad (4)$$

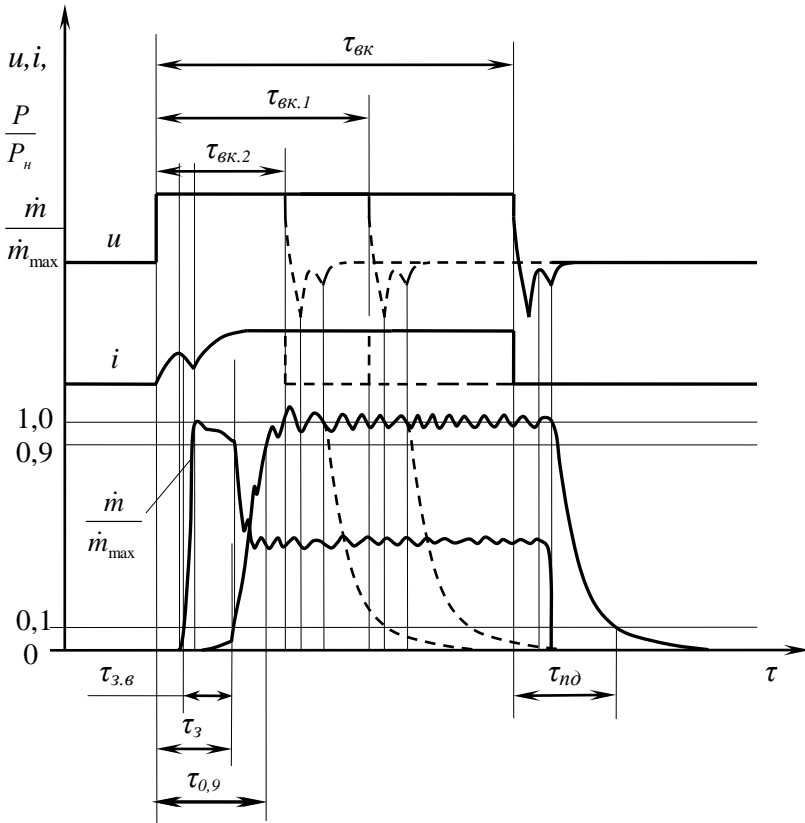


Рис. 1. Диаграмма работы ЖРДМТ при коротком единичном включении

Полагая коэффициент расхода форсунок горючего и окислителя μ_ϕ неизменным, т.е. независимым 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 вре-

мени запуска ЖРДМТ τ_3 и времени выхода двигателя на режим $\tau_{0,9}$:

$$\dot{m}_{\tau_{0,9}} = \dot{m} \sqrt{\frac{P_{ex}}{P_{ex} - P_{к.н}}}. \quad (5)$$

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:

$$\bar{m}_{\tau_{0,9}} = \frac{m_{\tau_{0,9}}}{m_u} = \frac{\int_0^{\tau_{0,9}} \dot{m}_{ок} d\tau + \int_0^{\tau_{0,9}} \dot{m}_\Gamma d\tau}{\int_0^{\tau_{вк} + \tau_{н.о}} \dot{m}_{ок} d\tau + \int_0^{\tau_{вк} + \tau_{н.о}} \dot{m}_\Gamma d\tau}. \quad (6)$$

Из (6) 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. рис. 1).

Удельный импульс тяги ЖРДМТ в пустоте при коротком единичном включении

$$I_{у.н.и} = \frac{\int_0^{\tau_{вк} + \tau_{н.о}} P_n d\tau}{\int_0^{\tau_{вк} + \tau_{н.о}} \dot{m}_{ок} d\tau + \int_0^{\tau_{вк} + \tau_{н.о}} \dot{m}_\Gamma d\tau} = \frac{\int_0^{\tau_{вк} + \tau_{н.о}} P_n d\tau}{\int_0^{\tau_{вк} + \tau_{н.о}} \dot{m} d\tau} = \frac{I_{н.и}}{m_u}, \quad (7)$$

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

Из (7) 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 $I_{у.н.и}$ резко падает. Это хорошо видно на диаграмме работы ЖРДМТ в режиме короткого единичного включения при различных длительностях включения двигателя $\tau_{вк}$, изображенной на рис. 1.

Учитывая все сказанное, изобразим на рис. 2 теоретическую динамическую характеристику ЖРДМТ по длительности включения, т.е. построим вид зависимостей $I_{у.н.и}, \beta_u, \bar{m}_{\tau_{0,9}} = f(\tau_{вк})$.

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 $I_{у.н}$ на непрерывном

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

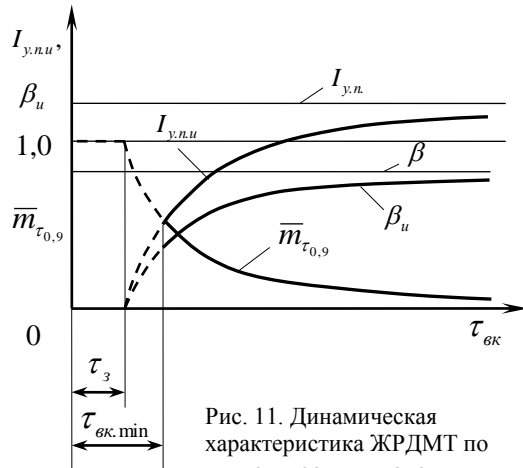


Рис. 11. Динамическая характеристика ЖРДМТ по длительности включения

камеру, используется неэффективно для создания тяги, во времени включения ЖРДМТ $\tau_{\text{вк}}$ значительно снижается (см. рис. 1 и 2).

При переходе от непрерывного режима к импульсному имеют место дополнительные, не учтенные 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 $\tau_p = \tau_{\text{вк}} + \tau_{\text{н.д}}$, (см. рис. 9), получаемого от выгорания и испарения топлива из заклепанных полостей после останова двигателя. Изучение импульса последействия двигателя является самостоятельной задачей, решение которой направлено на минимизацию величины импульса последействия.

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.

4. ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЯ

Испытания проводятся на серийном ЖРДМТ 11Д457 средней номинальной тягой 55 Н разработки ФГУП НИИМАШ. Двигатель имеет вытеснительную подачи топлива и работает на двухкомпонентном самовоспламеняющемся топливе: азотный тетраоксид (АТ) – окислитель и несимметричный диметилгидразин (НДМГ) – горючее.

Рабочее давление компонентов топлива на входе в двигатель 1,05...1,35 МПа. Действительное массовое соотношение компонентов $K_m = 1,85 \pm 0,15$. ($\alpha_{ок} = 0,6 \pm 0,05$).

Время включения двигателя может изменяться от 0,03 до 300 с. Это необходимо знать при составлении программы испытания ЖРДМТ для определения его экспериментальной динамической характеристики по времени включения.

ЖРДМТ 11Д457 использовался в системе управления орбитальной пилотируемой станции «Янтарь», в КА «Неман», «Сапфир», «Кобальт-М», «Орлец», «Комета», «Дон», «Лотос», «Ресурс-Дк».

5. СТЕНД ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ И ИЗМЕРЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Испытания ЖРДМТ 11Д457 проводятся на огневом учебно-исследовательском стенде кафедры теории двигателей летательных аппаратов. Стенд предназначен для проведения учебных и исследовательских работ для изучения и исследования рабочего процесса и характеристик ЖРДМТ на непрерывном и импульсном режимах работы. Стенд позволяет испытывать ЖРДМТ, работающие на жидких токсичных, самовоспламеняющихся компонентах топлива АТ и НДМГ, поэтому все его элементы выполнены в соответствии с требованиями обеспечения безопасности людей и окружающей среды, а системы, непосредственно подверженные воздействию компонентов, их паров и продуктов сгорания, выполняются из нержавеющей агрессивно-стойких материалов.

Стенд состоит из двух помещений кабины управления и огневого бокса. Магистрантам разрешается находиться вместе с преподавателем, ведущим занятия, только в кабине управления. В бокс заходить строго воспрещается!

Стенд включает установку для испытания двигателей в земных условиях и барокамеру, соединенную с механическим вакуумным насосом. Это обеспечивает возможность проведения исследований ЖРДМТ тягой до 100 Н в земных условиях на непрерывных установившихся и импульсных режимах работы. ЖРДМТ тягой до 20 Н

могут испытываться в условиях, имитирующих космическое пространство (условиях вакуума и термостатирования).

Более детальное изучение устройства стенда и его системам магистранты проводили и будут проводить на лекционных и лабораторных занятиях по учебным дисциплинам «Теория, расчет и проектирование ракетных двигателей» и «Испытание ракетных двигателей и двигательных установок».

При проведении испытаний ЖРДМТ необходимо проводить измерение и регистрацию следующих параметров:

- давление в магистралях горючего и окислителя на входе в двигатель – пружинными образцовыми манометрами класса точности 0,4 с визуальной регистрацией и индуктивными электрическими манометрами с первичным преобразователем ДД-10 и усилителем ИД-2И со средней квадратичной погрешностью измерения $\pm 1\%$;
- давление в камере сгорания – пружинным образцовым манометром класса точности 0,4 с визуальной регистрацией и индуктивным электрическим манометром с первичным преобразователем ДД-10 и усилителем ИД-2И со средней квадратичной погрешностью измерения $\pm 1\%$;
- расходы горючего и окислителя – объемными расходомерами или штихпроберами с погрешностью измерения $\pm 0,5\%$;
- температуры горючего и окислителя в топливных магистралях на входе в двигатель – термодатчиками группы хромель-копель с регистрацией полуавтоматическим потенциометром КСП-4, погрешностью измерения $\pm 1,5\%$;
- время включения двигателя – светолучевым осциллографом Н-115 по отметкам времени на осциллограмме, погрешность измерения $\pm 2\%$;

Регистрация быстропеременных давления в камере сгорания, давлений горючего и окислителя на входе в двигатель, напряжения и тока управляющего электрического сигнала, подаваемого на двигатель, осуществляется светолучевым осциллографом Н-115 на ультрафиолетовой фотобумаге УФ-67 шириной 120 мм.

6. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Перед началом испытания ЖРДМТ учебно-исследовательский стенд приводится в рабочее состояние. Не заходя на стенд, включаются приточная и вытяжная вентиляции стена. Через 10 минут открывается дверь в кабину управления стена и подается рабочее напряжение на пульт управления и все системы стенда. Системы приводятся в рабочее состояние.

Испытания ЖРДМТ проводятся на наземной установке, где и устанавливается испытуемый ЖРДМТ 11Д457 на станке в вертикальном положении соплом вниз.

Методика испытания ЖРДМТ для определения его экспериментальной динамической характеристики по длительности включения следующая:

1. Проводится градуировка измерительного канала измерения давления в камере сгорания в импульсном режиме индуктивным электрическим манометром с помощью образцового пружинного манометра класса точности 0,4.
 - 1.1. ЖРДМТ вручную или с генератора импульсов запускается на 1,5...2,0 с.
 - 1.2. Визуально фиксируются и записываются показания образцового пружинного манометра.
 - 1.3. Записывается на шлейфовом осциллографе отклонения шлейфа измерения давления в камере сгорания индуктивным электрическим манометром.
2. Устанавливается на образцовых пружинных манометрах по магистрали горючего и окислителя 56 делений шкалы прибора, что соответствует избыточному давлению компонентов на входе в двигатель 14 кг/см^2 (1373,4 кПа).
3. Устанавливается на генераторе импульсов или компьютере последовательно:
 - 3.1. Времена включения ЖРДМТ $\tau_{вк}$ (длительности управляющего электрического сигнала) 0,030 с; 0,060 с; 0,100 с; 0,300 с; 0,600с.
 - 3.2. Частоты включения двигателя f соответственно 15,0; 10,0; 7,5; 3,0; 1,5 Гц.

- 3.3. Количество включений в серии данной длительности n соответственно 10; 5; 5; 2; 2.
4. Перед запуском визуально регистрируются температура горючего и окислителя на входе в двигатель и уровни горючего и окислителя в соответствующих расходомерах.
 5. С пульта управления производится запуск. Автоматизированная система запуска сначала включает осциллограф, потом муфту протяжки бумаги и только затем подаются управляющие электрические сигналы на ЖРДМТ. Когда двигатель отработает, осциллограф автоматически выключается.
 6. После запуска визуально регистрируются уровни горючего и окислителя в соответствующих расходомерах.
 7. Пункты 3, 4, 5, 6 повторяются на всех пяти режимах работы двигателя, отличающихся временем включения.

Проявленная на дневном свете осциллограмма с результатом градуировки содержит необходимую информацию для определения основных параметров ЖРДМТ и его экспериментальной динамической характеристики по времени включения.

7. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Обработка результатов испытания ЖРДМТ проводится в следующей последовательности:

1. Давление горючего и окислителя на входе в двигатель

$$P_{\text{вх.г}} = P_{\text{вх.г.м}} + P_n, \quad (8)$$

$$P_{\text{вх.ок}} = P_{\text{вх.ок.м}} + P_n, \quad (9)$$

где $P_{\text{вх.г.м}}$ и $P_{\text{вх.ок.м}}$ – избыточные давления подачи горючего и окислителя соответственно, измеренные образцовыми манометрами, P_n – давление окружающей среды.

Запишем рабочее уравнение для подсчета абсолютного давления подачи горючего в кПа

$$p_{\text{ex.г}} = \left(p_{\text{ex.г.м}} K_{\text{г}} + \frac{P_{\text{н}}}{735,6} \right) 98,1 \quad [\text{кПа}], \quad (10)$$

где $p_{\text{ex.г.м}}$ – избыточные давления подачи горючего в делениях шкалы манометра, $K_{\text{г}}$ – цена деления шкалы образцового манометра горючего, $P_{\text{н}}$ – давление окружающей среды в мм рт. ст.

2. Давление в камере сгорания двигателя на установившемся режиме, измеренное образцовым манометром,

$$p_{\text{к.уст.м}} = (p_{\text{к.уст.м}} K + p_{\text{н}}), \quad (11)$$

где $p_{\text{к.уст.м}}$ – избыточные давления в камере сгорания в делениях шкалы манометра, K – цена деления шкалы образцового манометра.

3. Масса горючего и окислителя, выработанная ЖРДМТ за одно включение:

$$m_{\text{г}} = \mu_{\text{г}} \Delta l_{\text{г}} \rho_{\text{г}} \frac{1}{n}, \quad (11)$$

где $\mu_{\text{г}}$ – градуировочный коэффициент расходомера горючего, $\Delta l_{\text{г}}$ – разница уровней горючего по шкале расходомера до и после включения двигателя, $\rho_{\text{г}}$ – плотность горючего, n – количество включений двигателя в серии одной длительности.

$$m_{\text{ок}} = \mu_{\text{ок}} \Delta l_{\text{ок}} \rho_{\text{ок}} \frac{1}{n}, \quad (12)$$

где $\mu_{\text{ок}}$, $\Delta l_{\text{ок}}$ и $\rho_{\text{ок}}$ – те же величины, что и в уравнении (11), но относящиеся к окислителю и расходомеру окислителя.

Градуировочные коэффициенты расходомеров были определены при их очередной метрологической аттестации. Для стендовых расходомеров горючего и окислителя $\mu_{\text{г}} = 0,159 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{мм}$, $\mu_{\text{ок}} = 0,144 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{мм}$.

Плотности горючего (несимметричного диметилгидрозина) $\rho_{\text{г}}$ и окислителя (азотного тетраоксида) $\rho_{\text{ок}}$, зависящие от температуры, могут быть взяты для требуемой температуры из приложения (табл. III).

4. Масса топлива, выработанного ЖРДМТ за одно включение ЖРДМТ

$$m = m_{\Gamma} + m_{ок}. \quad (13)$$

5. Средние массовые расходы компонентов топлива за одно включение ЖРДМТ (за один импульс):

$$\dot{m}_{\Gamma} = \frac{m_{\Gamma}}{\tau_{вк}}, \quad (14)$$

$$\dot{m}_{ок} = \frac{m_{ок}}{\tau_{вк}}, \quad (15)$$

где $\tau_{вк}$ – время включения ЖРДМТ, представляющее собой интервал времени от момента подачи напряжения на управляющий электромагнитный клапан двигателя до момента снятия напряжения.

6. Средний массовый расход топлива

$$\dot{m} = \frac{m_{\Gamma} + m_{ок}}{\tau_{вк}} = \dot{m}_{\Gamma} + \dot{m}_{ок}. \quad (16)$$

7. Фактическое (действительное) массовое соотношение компонентов

$$K_m = \frac{\dot{m}_{ок}}{\dot{m}_{\Gamma}}. \quad (17)$$

8. Коэффициент избытка окислителя

$$\alpha_{ок} = \frac{K_m}{K_m^o}, \quad (18)$$

где K_m^o – стехиометрическое массовое соотношение компонентов.

Для топлива НДМГ и АТ $K_m^o = 3,073$.

9. Градуировочный коэффициент давления в камере сгорания

$$\mu_{p_{\kappa}} = \frac{p_{\kappa,уст.}}{l_{p_{\kappa}}} \left[\frac{\text{кПа}}{\text{мм}} \right], \quad (19)$$

где $p_{\kappa,уст.}$ – давление в камере сгорания ЖРДМТ на установившемся режиме в кПа; $l_{p_{\kappa}}$ – отклонение луча шлейфа давления в камере сгорания от начального нулевого уровня в мм.

10. Градуировочный коэффициент времени

$$\mu_\tau = \frac{0,2}{l_\tau}, \left[\frac{\text{с}}{\text{мм}} \right], \quad (20)$$

где 0,2 – время в секундах, соответствующее десяти интервалам отметчика времени на осциллограмме или экране монитора; l_τ – расстояние в мм десяти интервалов отметчика времени.

11. 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 $\tau_{\text{вк}} + \tau_{\text{нд}}$.

$$S_{p_\kappa} = \int_0^{\tau_{\text{вк}} + \tau_{\text{нд}}} p_\kappa d\tau = S \mu_{p_\kappa} \mu_\tau, \quad (21)$$

где S – геометрическая площадь в мм^2 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 $\tau_{\text{вк}} + \tau_{\text{нд}}$.

12. Расходный комплекс в импульсном режиме

$$\beta_u = \frac{F_M \int_0^{\tau_{\text{вк}} + \tau_{\text{нд}}} p_\kappa d\tau}{\int_0^{\tau_{\text{вк}} + \tau_{\text{нд}}} \dot{m}_\tau d\tau + \int_0^{\tau_{\text{вк}} + \tau_{\text{нд}}} \dot{m}_{\text{ок}} d\tau} = \frac{F_M \int_0^{\tau_{\text{вк}} + \tau_{\text{нд}}} p_\kappa d\tau}{\int_0^{\tau_{\text{вк}} + \tau_{\text{нд}}} \dot{m} d\tau} \quad (22)$$

или

$$\beta_u = \frac{S_{p_\kappa} F_M}{m}, \quad (23)$$

где F_M – площадь минимального сечения сопла; m – масса топлива, выработанного двигателем за одно включение.

Площадь минимального сечения сопла испытываемого ЖРДМТ $F_M = 50,3 \text{ мм}^2$ была измерена до начала испытаний ЖРДМТ.

13. Удельный импульс тяги в пустоте в импульсном режиме

$$I_{y.n.u} = \frac{\int_0^{\tau_{ак} + \tau_{нд}} P_n d\tau}{\int_0^{\tau_{ак} + \tau_{нд}} \dot{m} d\tau} = \frac{\int_0^{\tau_{ак} + \tau_{нд}} P_n d\tau}{m} \quad (24)$$

или

$$I_{y.n.u} = K_{P_n.u} \beta_u, \quad (25)$$

где $K_{P_n.u}$ – тяговый комплекс в пустоте в импульсном режиме.

$$K_{P_n.u} = \frac{\int_0^{\tau_{ак} + \tau_{нд}} P_n d\tau}{F_M \int_0^{\tau_{ак} + \tau_{нд}} p_\kappa d\tau} = \frac{I_{y.n.u}}{\beta_u}. \quad (26)$$

Для испытываемого ЖРДМТ экспериментальное значение тягового комплекса в пустоте в импульсном режиме составляет $K_{P_n} = 1,75$. Оно было определено ранее.

14. Импульс тяги, создаваемый ЖРДМТ за одно включение,

$$I_u = \int_0^{\tau_{ак} + \tau_{нд}} P_n d\tau = K_{P_n} F_M \int_0^{\tau_{ак} + \tau_{нд}} p_\kappa d\tau = K_{P_n} F_M S_{p_\kappa}. \quad (27)$$

15. Коэффициент полноты расходного комплекса в импульсном режиме

$$\varphi_{\beta_u} = \frac{\beta_u}{\beta_{u\delta}}, \quad (28)$$

где $\beta_{u\delta}$ – идеальный расходный комплекс, полученный термодинамическим расчетом /2/.

Значение идеального расходного комплекса при полученном в эксперименте коэффициенте избытка окислителя может быть взято из приложения (табл. П2)

16. Коэффициент полноты тягового комплекса в пустоте на импульсном режиме

$$\varphi_{K_{P_n \cdot u}} = \frac{K_{P_n \cdot u}}{K_{P_n \cdot u \delta}}, \quad (29)$$

где $K_{P_n \cdot u \delta}$ – идеальное значение тягового комплекса в пустоте, полученное термодинамическим расчетом / 2/.

17. Коэффициент удельного импульса тяги в импульсном режиме

$$\varphi_{I.u} = \varphi_{\beta.u} \varphi_{K_{P_n \cdot u}}. \quad (30)$$

9. ЗАДАНИЕ

1. Построить экспериментальную динамическую характеристику ЖРДМТ по времени включения.
2. Проанализировать характер протекания экспериментальной динамической характеристики ЖРДМТ по времени включения, сравнив её с теоретической.
3. Оценить совершенство рабочего процесса в камере сгорания испытуемого ЖРДМТ 11Д457.
4. Оценить эффективность работы сверхзвукового сопла двигателя.
5. Назвать причины снижения удельного импульса тяги в пустоте на импульсном режиме при уменьшении времени включения двигателя.
6. Какие мероприятия в ЖРДМТ позволят повысить коэффициент полноты расходного комплекса в импульсном режиме $\varphi_{\beta.u}$?

10. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ ПО РАБОТЕ

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Методику проведения эксперимента
2. Основные уравнения, используемые при обработке результатов эксперимента и их анализ.

3. Обработанную осциллограмму (одна осциллограмма на бригаду студентов).

4. Таблицы результатов эксперимента и обработки этих результатов.

5. Экспериментальную динамическую характеристику ЖРДМТ по времени включения.

5. Анализ полученных результатов, и характера протекания экспериментальной динамической характеристики ЖРДМТ по времени включения.

6. Краткие ответы на вопросы задания

Зачет по лабораторной работе ставится преподавателем по результатам устного собеседования со студентом, выполнившим работу и представившим качественно оформленный отчет.

11. КОНТРОЛЬНОЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите отличительные особенности рабочего процесса ЖРДМТ и его характеристик.
2. Нарисуйте теоретическую динамическую характеристику ЖРДМТ по времени включения и объясните характер её протекания.
3. Что понимается под динамическими параметрами и динамическими характеристиками ЖРДМТ?
4. Какие параметры измерялись при испытании ЖРДМТ для определения его характеристики по времени включения?
5. Зачем необходимо знание обобщенной экспериментальной характеристики ЖРДМТ 11Д457 по времени включения?
6. Назовите причины снижения действительного удельного импульса тяги ЖРДМТ в импульсном режиме по сравнению с теоретическим, полученным термодинамическим расчетом.
7. Какова необходимость огневых стендовых испытаний вновь проектируемых ЖРДМТ?
8. Цель проведения огневых стендовых испытаний разрабатываемых и серийных ЖРДМТ в земных условиях.
9. Каким образом оцениваемся совершенство, рабочего процесса ЖРДМТ, его экономичность?
10. Какие основные параметры ЖРДМТ измеряются при проведении огневых стендовых испытаний?
11. Как используются результаты огневых стендовых испытаний при доводке двигателя?

Библиографический список

1. Алемасов, В.Е. Теория ракетных двигателей: учебник для студентов втузов / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин; под редакцией В.П. Глушко.– М.: Машиностроение, 1989.– 464 с.: ил.
2. Салич, В.Л. Жидкостные ракетные двигатели малой тяги: учебное пособие / В.Л. Салич, А.А. Шмаков, С.Д. Ваулин.– Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006.–52 с.: ил.
3. Добровольский, М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования: учебник 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.: ил.
4. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей: учебник для студентов вузов по спец. «Авиационные двигатели и энергетические установки» / Г.Г. Гахун, В.И. Баулин, В.А. Володин [и др.]; под общ. ред. Г.Г. Гахуна.– М.: Машиностроение, 1989.– 424 с.: ил.
5. Жуковский, А.Е. Испытания жидкостных ракетных двигателей: учебник для студентов авиац. спец. Вузов / А.Е. Жуковский, В.С. Кондрусев, В.В. Окорочков.– 2-е изд., перераб. и доп.– М.: Машиностроение, 1992.– 352 с.: ил.
6. Егорычев, В.С. Топлива химических ракетных двигателей: учебное пособие / В.С. Егорычев, В.С. Кондрусев.– Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007.– 72 с.: ил.
7. Мелькумов, Т.М. Ракетные двигатели / Т.М. Мелькумов, Н.И. Мелик-Пашаев, П.Г. Чистяков, А.Г. Шиуков.– М.: Машиностроение, 1976. – 399 с.: ил.
8. Егорычев, В.С. Топлива химических ракетных двигателей: учебное пособие / В.С. Егорычев, В.С. Кондрусев.– Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007.– 72 с.: ил.

Приложение

Таблица П1
Плотности НДМГ и АТ в зависимости от температуры

№ п/п	t	ρ_{Γ}	$\rho_{ок}$
	°С	кг/м ³	кг/м ³
1	2	3	4
1	10	801	1467
2	12	798	1463
3	14	796	1458
4	16	794	1454
5	18	793	1450
6	20	790	1446
7	22	788	1441
8	24	786	1437
9	26	784	1432
10	28	782	1428
11	30	780	1424
12	32	778	1419
13	35	774	1413

Таблица П2
Идеальные значения удельного импульса тяги в пустоте и расходного комплекса при различных давлениях в камере сгорания, полученные термодинамическим расчетом

№ п/п	$\alpha_{ок}$	$\beta_{уд}$	$I_{у.п.уд}$	$K_{P_{н.уд}}$
		м/с	м/с	
1	2	3	4	5
1	0,2	1360	2710	2,01
2	0,3	1490	2820	1,93
3	0,4	1625	2990	1,85
4	0,5	1690	3150	1,85
5	0,6	1730	3260	1,87
6	0,7	1736	3340	1,91
7	0,8	1730	3380	1,96
8	0,9	1710	3380	2,01
9	1,0	1680	3360	2,03
10	1,1	1645	3300	2,02
11	1,2	1610	3210	2,01

**Экспериментальная динамическая
характеристика ЖРДМТ по времени
включения**

Электронные методические указания
к лабораторной работе

Составитель *Егорычев Виталий Сергеевич*

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