

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЫСТРОРАСХОДНЫХ ГАЗОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Представлены результаты экспериментальных исследований энергетических характеристик быстрорасходных газореактивных двигательных установок и их сравнение с результатами теоретических исследований.

Наведено результати експериментальних досліджень енергетичних характеристик швидковитратних газореактивних рушійних установок та їх порівняння з результатами теоретичних досліджень.

The experimental results of energy characteristics of high-flowrate gas-jet propulsion systems and their comparison with the results of theoretical investigation are presented.

Быстрорасходными можно назвать газореактивные двигательные установки (ГРДУ), у которых требуемый суммарный импульс тяги вырабатывается в течение времени, не превышающего нескольких минут. Работа быстрорасходных ГРДУ характеризуется интенсивным изменением температуры и давления газа в баллонах. В статьях [1, 2] приведены результаты теоретических исследований ГРДУ. Показано, что для быстрорасходных ГРДУ с высоким давлением заправки располагаемый суммарный импульс тяги целесообразно определять по формуле

$$I_{\Sigma} = \int_0^{m_p} I_{y0} dm_p, \quad (1)$$

где I_{y0} – удельный импульс тяги;
 m_p – масса израсходованного газа.

$$I_{\Sigma} = A \sqrt{\frac{T_{zh} C}{C+1}} \cdot \frac{C^{\frac{1}{(k-1)(C+1)}} m_{zh}}{(k-1)(C+1)} \left\{ \frac{(k-1)(C+1) \left(\frac{m_p}{m_{zh}}\right) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} - 1\right) \cdots \left(\frac{1}{2} - n + 1\right)}{C^{\frac{1}{(k-1)(C+1)}} \left(\frac{m_p}{m_{zh}}\right)} \cdot \frac{\left[\left(1 - \frac{m_p}{m_{zh}}\right)^{1+n(k-1)(C+1)} - 1 \right]}{\left[\frac{1}{(k-1)(C+1)} + n \right] \cdot C^{\frac{1}{(k-1)(C+1)+n}}}, \right\} \quad (2)$$

где $A = \frac{\varphi}{\mu} \cdot \frac{K_T}{K_P}$;

$$K_P = \sqrt{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \cdot \frac{k}{R}};$$

$$C = \frac{1,01 \cdot A_0 \sqrt{T_z} \cdot F}{R \mu K_P f} \left(\frac{T_{zh}}{P_{zh}}\right)^{\frac{1}{3}};$$

Были рассмотрены два наиболее часто встречающихся типа ГРДУ:

1. С непрерывным истечением газа из баллонов при условии отсутствия регулирования давления газа перед соплами. Принципиальная схема ГРДУ приведена в [1, с. 149].

В этом случае расход газа является переменной величиной, зависящей от количества газа в баллонах.

2. С истечением газа из баллонов путем периодических включений микродвигателей при наличии регулирования давления газа перед соплами. Принципиальная схема ГРДУ приведена в [1, с. 150].

В этом случае расход газа принимается усредненным в течение всего времени работы ГРДУ.

Для первого типа ГРДУ аналитическое решение уравнения (1) имеет следующий вид:

A_0 – коэффициент, слабо зависящий от температуры;

$$A_0 \sqrt{T_z} = \text{const};$$

$$m_p = m_{zh} - m_z;$$

T_{zh} и T_z – начальное и текущее значения температуры газа;

- m_{zn} и m_z – начальное и текущее значения массы газа в баллонах;
 φ – коэффициент потерь тяги в сопле;
 μ – коэффициент расхода;
 K_T – коэффициент тяги;
 k – показатель адиабаты;
 R – газовая постоянная;
 F – площадь внутренней поверхности баллонов;
 f – площадь отверстия, через которое истекает газ;
 P_{zn} – начальное давление газа в баллонах.

Ограничиваясь конечным числом членов степенного ряда, можно получить значения I_Σ с любой необходимой для практики точностью.

Для второго типа ГРДУ аналитическое решение уравнения (1) имеет следующий вид:

$$I_\Sigma = \frac{A\dot{m}_{cp}}{N} \cdot \sqrt{\frac{CT_{zn}}{C+1}} \left[\ln \left| \operatorname{sh} \left(N \frac{m_{zn}}{\dot{m}_{cp}} + \operatorname{arth} \sqrt{\frac{C}{C+1}} \right) - \ln \frac{\sqrt{\frac{C}{C+1}}}{\sqrt{1-\frac{C}{C+1}}} \right| \right], \quad (3)$$

где $N = \frac{(k-1)R\sqrt{C(C+1)}\mu \cdot K_p f \sqrt{T_{zn}}}{2V_6}$;

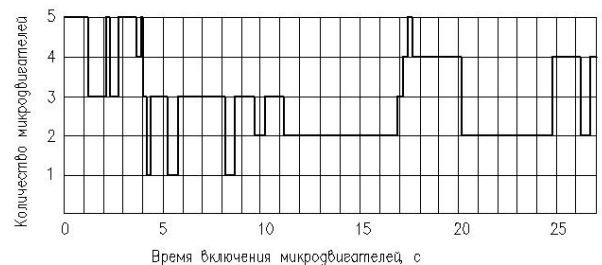
- $\dot{m}_{cp} = \frac{m_p}{\tau_p}$ – усредненный за время опорожнения баллонов τ_p расход газа;
 V_6 – объем баллонов.

Экспериментальное исследование энергетических характеристик проводилось как на опытных установках, так и при экспериментальной отработке штатных ГРДУ на стендах ГП "КБ "Южное".

ГРДУ были оснащены датчиками давления типа МД – для измерения давления в баллонах и перед соплами, датчиками температуры типа ТПО 18-05 – для измерения температуры стенки баллонов и термопарами типа Е827-ХК-55 – для измерения температуры рабочего тела перед соплами.

Испытания ГРДУ первого типа проводились в вакуум-камере объемом 32 м³. Начальное давление в вакуум-камере составляло не более 7·10⁻³ Па. Баллоны заправлялись сжатым воздухом. Истечение воздуха производилось непрерывно через два сопла. Диаметр критического сечения сопел варьировался от 1 до 2 мм.

Испытания ГРДУ второго типа проводили в вакуум-камере объемом 10 м³. Давление в вакуум-камере составляло около 270 Па. Баллоны заправлялись сжатым азотом. Истечение азота происходило за пределы вакуум-камеры через сопла микродвигателей с диаметром критического сечения 3 мм по циклограмме, приведенной на рисунке.



Циклограмма работы ГРДУ

Определение суммарного импульса тяги проводилось косвенным методом.

При испытаниях ГРДУ первого типа суммарный импульс тяги определялся путем обработки экспериментальных данных по изменению давления газа перед соплом по формуле

$$I_\Sigma = \varphi K_T f_{kp} \int_0^{\tau_k} P_c d\tau, \quad (4)$$

- где f_{kp} – площадь критического сечения сопла;
 P_c – давление газа перед соплом;
 τ_k – время окончания истечения газа из баллонов (при полном опорожнении баллонов принималось $\tau_k = \infty$).

Суммарный импульс тяги, отработанный ГРДУ второго типа, определялся по времени нахождения микродвигателей во включенном состоянии и создаваемой ими тяге с использованием следующей зависимости:

$$I_\Sigma = \sum_n \sum_k (R_{cp} \tau)_{nk}, \quad (5)$$

где $(R_{cp} \tau)_{nk}$ – импульс n -того микродвигателя при k -том включении;
 $R_{cp.nk}$ – средняя тяга n -того микродвигателя при k -том включении;
 τ_{nk} – длительность k -того включения n -того микродвигателя;
 n – число микродвигателей;
 k – число включений каждого микродвигателя.

Средняя тяга микродвигателей определялась по формуле

$$R_{cp.nk} = \varphi K_T f_{kp} P_{cp.nk}, \quad (6)$$

где $P_{cp.nk}$ – среднее значение давления перед микродвигателями при k -том включении n -того микродвигателя.

В расчетах использовалась следующая экспериментальная зависимость:

$$R_{cp} = 1,15 \cdot 10^{-5} P_{cp}, \quad (7)$$

где P_{cp} – измерялось в паскалях;

$R_{cp.nk}$ – измерялось в ньютонах.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований

Тип ГРДУ	Давление заправки рабочего тела, МПа	Конечное давление рабочего тела, МПа	Температура рабочего тела после заправки, °С	Объем баллонов, 10^{-3} м^3	Время опорожнения баллонов, с	Экспериментальное значение суммарного импульса тяги, Н·с	Теоретическое значение суммарного импульса тяги, Н·с
Первый	20,9	0	19	3,72	87	564,1	534,1
«	21,6	0	18	3,79	110	574,1	559,6
«	21,1	0	22	3,79	51	561,3	525,7
«	21,4	0	17	3,79	37	574,0	582,0
«	7,36	0	42	3,7	35	201,1	190,7
«	7,36	0	-25	3,7	45	239,4	224,7
«	14,7	0	-28	3,7	60	461,1	444,9
Второй	25,3	12,2	34	79,8	30	4470	4575,3
«	24,6	7,88	25	53,7	30	4280	4454,3
«	25,1	12,3	34	80,1	30	4740	4805,7
«	24,8	7,84	32	53,9	30	4120	4276,8
«	23,9	7,43	20	52,0	30	4240	4327,7
«	24,5	7,54	25	52,6	30	4300	4407,1
«	24,3	7,99	24	53,1	30	4340	4419,8
«	23,0	10,8	13	78,9	30	4380	4513,5

Результаты экспериментального определения суммарного импульса тяги сравнивались с результатами расчета по аналитическим зависимостям (2) и (3). В таблице приведены экспериментальные и теоретические значения суммарного импульса тяги для различных значений варьируемых параметров.

Из таблицы видно, что теоретические значения суммарного импульса тяги отличаются от экспериментальных на 1,4-6,5%, что можно считать хорошим результатом.

Результаты исследований реализованы при проектировании ГРДУ для космических аппаратов разработки ГП "КБ "Южное", в том числе для индийского космического аппарата "Ариабата".

Список использованной литературы

1. Анищенко В.М. Определение расходуемого суммарного импульса тяги быстрорасходных газореактивных двигателей установок // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – Днепропетровск: ГП "КБ "Южное", 2008. – Вып. 1. – С. 146–157.
2. Анищенко В.М. Суммарный импульс тяги быстрорасходных газореактивных двигателей установок с учетом дроссель-эффекта // Техническая механика: Науч. журн. – Днепропетровск: ИТМ НАНУ и ГКАУ, 2010. – № 1. – С. 62–69.

Статья поступила 14.04.2016