

УДК 621.454.3.02

Р.В. Кальныш, А.С. Кириченко, В.С. Фоменко

## ОЦЕНКА ДОПУСТИМОСТИ ГИПОТЕЗЫ ПОСТОЯНСТВА ПУСТОТНОГО УДЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСА ТЯГИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКЕ РДТТ

*На этапах проектирования и экспериментальной отработки оперативно-тактических ракет с маршевыми двигателями на твердом топливе возникает необходимость быстрой оценки энергетических характеристик ДУ, в частности определение значения и разброса удельного импульса тяги. Использование гипотезы постоянства удельной тяги (слабая зависимость пустотного импульса тяги от давления и температуры) позволяет существенно упростить методику оценки удельного импульса тяги РДТТ, повысить тем самым оперативность проектных расчетов по РДТТ и ускорив обработку результатов испытаний, а в некоторых случаях даже существенно сократить объем испытаний.*

*На етапах проектування й експериментального відпрацювання оперативно-тактичних ракет з маршовими двигунами на твердому паливі виникає необхідність швидкого оцінювання енергетичних характеристик РУ, зокрема визначення значення і розкиду питомого імпульсу тяги. Використання гіпотези сталості питомої тяги (слабка залежність пустотного імпульсу тяги від тиску й температури) дозволяє істотно спростити методику оцінювання питомого імпульсу тяги РДТТ, підвищивши тим самим оперативність проектних розрахунків для РДТТ та прискоривши оброблення результатів випробувань, а в деяких випадках навіть істотно скоротити обсяг випробувань.*

*In the phase of designing and developmental testing of short-range missiles with main solid rocket motors, the necessity arises of quick evaluation of propulsion system power characteristics, in particular, determination of specific thrust pulse value and scatter. The use of hypothesis of specific thrust constancy (weak dependence of vacuum thrust pulse on pressure and temperature) allows to considerably simplify the procedure of SRM specific thrust pulse evaluation, thus increasing the efficiency of SRM design calculations and the speed of test results processing, and in some cases, even to considerably reduce the test scope.*

В последние годы в требованиях ТЗ температурный диапазон боевого применения расширился и составил  $-40...+50^{\circ}\text{C}$ . Ранее (70-80-е годы) он составлял  $+5...+25^{\circ}\text{C}$ , а температурный разброс пустотного удельного импульса тяги не превышал  $\pm(0,15-0,1)\%$  от среднего значения, что было как минимум на метрологический порядок меньше погрешности системы измерений тяги  $0,7-1,0\%$  и технологического разброса пустотного удельного импульса тяги  $0,5-0,7\%$ , что в свою очередь позволяло пренебречь температурной составляющей при оценке общего разброса пустотного удельного импульса тяги. В неявном виде температурная составляющая присутствовала в общем разбросе пустотного удельного импульса тяги, так как при обработке результатов испытаний по удельной тяге приведения по температуре не проводилось. Учитывая то, что температурный диапазон применения увеличен более чем в четыре раза, возникает необходимость оценки и учета температурного разброса пустотного удельного импульса тяги не только при проект-

ных разработках (температурная составляющая разброса пустотного удельного импульса тяги жестко коррелирована с разбросом расхода), но и при экспериментальной отработке РДТТ, так как погрешность современной системы измерения тяги значительно уменьшилась и составляет  $0,1-0,05\%$ .

Поэтому для повышения точности расчетов целесообразно на этапе предварительного проектирования в расчетах, которые базируются на термодинамических зависимостях, учитывать следующие факторы:

- разброс пустотного удельного импульса тяги в зависимости значения от температурного диапазона боевого применения;
- разброс пустотного удельного импульса тяги в зависимости от давления в камере сгорания и его разброса и степени расширения для всех видов топлив.

В данной статье дается оценка гипотезы постоянства пустотной удельной тяги, используемой при проектных проработках и экспериментальной отработке РДТТ, определяются количественно границы действия

этой гипотезы для ряда составов твердых топлив в зависимости от значения температурного диапазона боевого применения, а также от давления в камере сгорания и его разброса и степени расширения.

Оценка зависимости пустотного удельного импульса тяги от начальной температуры проводилась прямым термодинамическим расчетом для различных составов твердых топлив. Энтальпию топлива в зависимости от температуры определяли по удельной теплоемкости топлива. На рис. 1 и 2 приведены результаты определения энтальпии для двух видов топлив в зависимости от температуры: топлива №1 (средне-энергетического) и топлива №2 (высоко-энергетического). Расчет термодинамического пустотного удельного импульса тяги для крайних значений температуры применения ( $t = -40^{\circ}\text{C}$ ,  $+50^{\circ}\text{C}$ ;  $+5^{\circ}\text{C}$ ,  $+25^{\circ}\text{C}$ ), для степени расширения  $f=10\dots60$  и давления  $P=20\dots200 \text{ кг/см}^2$  был проведен программным комплексом Астра.4 (Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах, МГТУ им. Баумана). В дальнейшем, используя результаты термодинамических расчетов, проводился расчет отклонения (размаха) пустотного удельного импульса тяги (1). Результаты расчета относительных отклонений (полный разброс, %) пустотного удельного импульса тяги приведены на рис. 3-6.

$$\Delta J_{\Delta t} = \frac{J_{(+50^{\circ}\text{C})} - J_{(-40^{\circ}\text{C})}}{0,5(J_{(+50^{\circ}\text{C})} + J_{(-40^{\circ}\text{C})})} \quad (1)$$

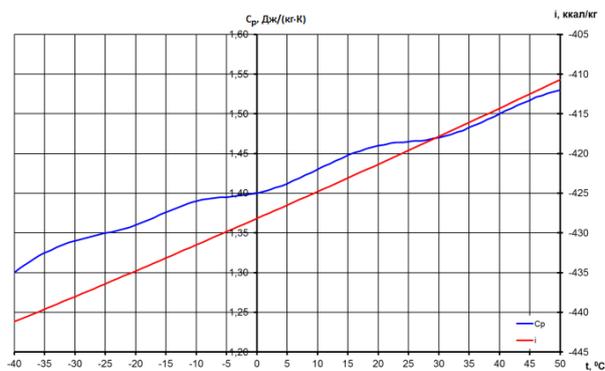


Рис. 1. Зависимость энтальпии топлива №1 от начальной температуры

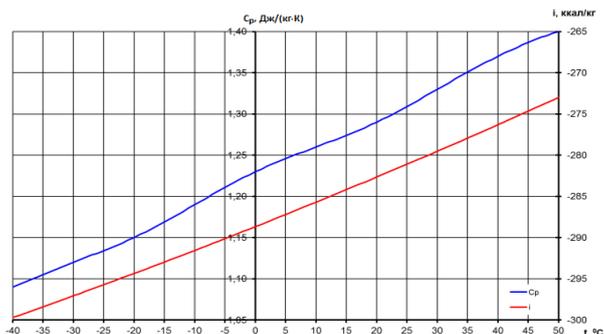


Рис. 2. Зависимость энтальпии топлива №2 от начальной температуры

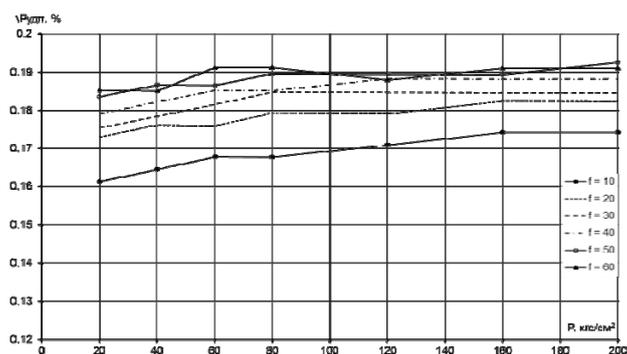


Рис. 3. Зависимость относительного изменения удельного импульса тяги от давления и степени расширения для температурного диапазона применения  $\Delta t=20^{\circ}\text{C}$  (топливо №1)

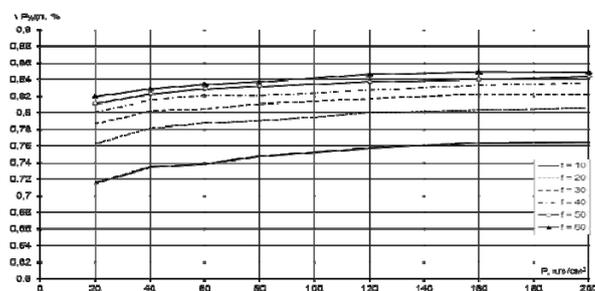


Рис. 4. Зависимость относительного изменения удельного импульса тяги от давления и степени расширения для температурного диапазона применения  $\Delta t=90^{\circ}\text{C}$  (топливо №1)

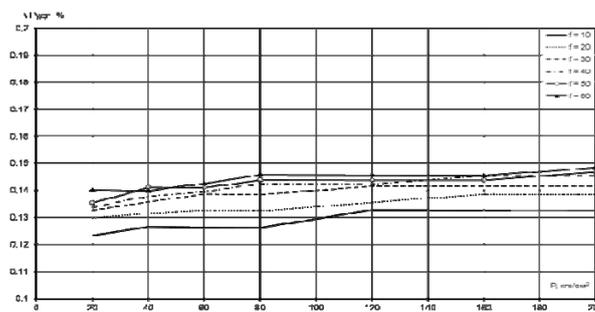


Рис. 5. Зависимость относительного изменения удельного импульса тяги от давления и степени расширения для температурного диапазона применения  $\Delta t=20^{\circ}\text{C}$  (топливо №2)

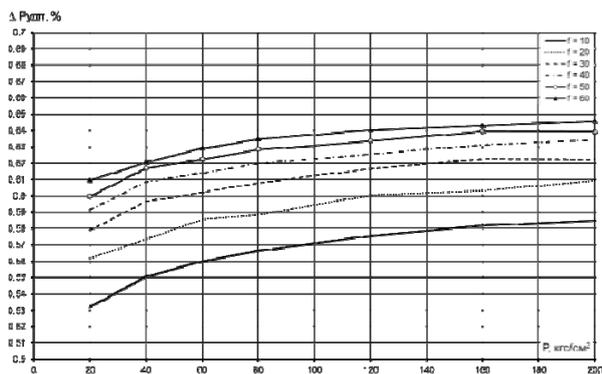


Рис. 6. Зависимость относительного изменения удельного импульса тяги от давления и степени расширения для температурного диапазона применения  $\Delta t=90^\circ\text{C}$  (топливо №2)

Представленные материалы подтверждают ранее принятую оценку разброса пустотного удельного импульса тяги для температурного диапазона  $\Delta t=20^\circ\text{C}$ , равную от  $-0,1$  до  $+0,07\%$ . Оценка разброса пустотного удельного импульса для температурного диапазона  $\Delta t=90^\circ\text{C}$  равна  $-0,45$  до  $+0,3\%$ , что потребует ее учета при проектных работах и экспериментальной отработке.

Используя результаты термодинамических расчетов топлив для фиксированных давлений и температуры, методом двойной кубической сплайн-интерполяции были проведены расчеты по определению разбросов значений удельного импульса тяги в диапазоне давлений  $20\text{--}200\text{ кгс/см}^2$  и степени расширения  $f=10\text{--}60$  для топлив №1 и 2 в зависимости от разброса давления  $\pm 25\%$  и  $\pm 50\%$  номинального значения. Результаты относительного (полный разброс, %) изменения удельной тяги в зависимости от давления и его разброса и степени расширения ( $f=10, 20, 30, 40, 50, 60$ ) для топлив №1 и 2 определяли по (2) и приведены на рис. 7, 8.

$$\Delta J_{\Delta P} = \frac{J_{\Delta P_1} - J_{\Delta P_2}}{0,5(J_{\Delta P_1} + J_{\Delta P_2})}, \quad (2)$$

где  $\Delta P_1 = P_{ном} + 25\%(50\%)$ ;

$\Delta P_2 = P_{ном} - 25\%(50\%)$ .

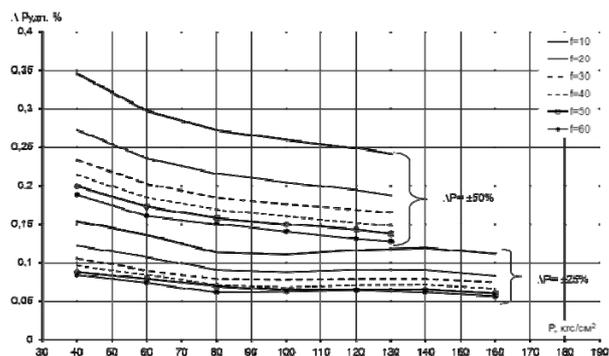


Рис. 7. Зависимость относительного изменения удельного импульса тяги от давления, разброса давления и степени расширения (топливо № 1)

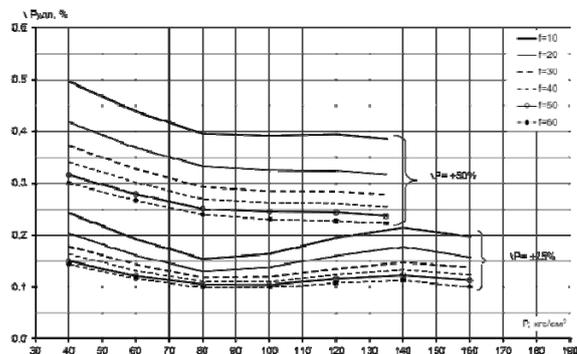


Рис. 8. Зависимость относительного изменения удельного импульса тяги от давления, разброса давления и степени расширения (топливо № 2)

Таким образом, исходя из представленных материалов, можно констатировать, что гипотеза постоянства удельной тяги выполняется с погрешностью от  $-0,25\%$  до  $+0,025\%$  в зависимости от типа твердого топлива и параметров двигателя (давления в камере сгорания и его разброса, степени расширения сопла).

### Выводы

1. Разброс пустотного удельного импульса тяги для температурного диапазона от  $5$  до  $25^\circ\text{C}$  для топлив №1 и 2 составляет от  $-0,07$  до  $+0,1\%$ , что позволяет не учитывать этот параметр на этапах проектирования и экспериментальной отработки РДТТ.

2. Разброс пустотного удельного импульса тяги для температурного диапазона от  $-40$  до  $+50^\circ\text{C}$  для топлив №1 и 2 составляет от  $-0,3$  до  $+0,45\%$ , что потребует учета этого разброса на этапах проектирования и экспериментальной отработки РДТТ.

3. Разброс пустотного удельного импульса тяги (гипотеза постоянства удель-

ной тяги) для топлив №1 и 2 при разбросе давления в камере сгорания  $\pm 25\%$ , составляет  $\pm 0,1\%$ . Данным значением разброса на этапе проектирования и экспериментальной отработки РДТТ можно пренебречь. При разбросе давления в камере сгорания  $\pm 50\%$  разброс удельного импульса тяги для топлив №1 и 2 может достигать  $\pm 0,25\%$ . Данным значением разброса на этапе проектирования и экспериментальной отработки РДТТ пренебречь нельзя.

Статья поступила 20.12.2015