

## СРОЧНОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 536.46

## ЛАБОРАТОРНАЯ МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЕДИНИЧНОГО ИМПУЛЬСА ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА

В. А. Архипов<sup>1</sup>, А. Б. Кискин<sup>2</sup>, В. Е. Зарко<sup>2</sup>, А. Г. Коротких<sup>1,3</sup><sup>1</sup>НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета, 634050 Томск  
leva@niipmm.tsu.ru<sup>2</sup>Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, 630090 Новосибирск<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск

Представлена новая лабораторная экспресс-методика определения единичного импульса твердых ракетных топлив, основанная на измерении реактивной силы продуктов газификации, оттекающих от горящей поверхности топлива. Определены значения единичного импульса для модельной композиции смесового твердого ракетного топлива при варьировании давления в камере сгорания.

Ключевые слова: твердое ракетное топливо, единичный импульс, реактивная сила продуктов сгорания, лабораторная методика.

## ВВЕДЕНИЕ

Основной энергетической характеристикой твердых ракетных топлив (ТРТ) является единичный импульс реактивной силы  $J_1$ , равный приросту тяги, реализуемому при сгорании единицы массы топлива. Значение  $J_1$  при полном отсутствии энергетических потерь и условии завершения химических превращений называется термодинамическим. Термодинамическое значение единичного импульса при равенстве давления в выходном сечении сопла наружному давлению (расчетное течение) определяется зависимостью [1]

$$J_1 = \sqrt{\frac{2kRT_c}{k-1} \left(1 - \frac{p_a}{p_c}\right)^{(k-1)/k}}, \quad (1)$$

где  $R$  и  $k$  — газовая постоянная и показатель адиабаты продуктов сгорания,  $p_c$  и  $T_c$  — давление и температура продуктов сгорания в камере двигателя,  $p_a$  — внешнее давление.

Расчетно-теоретический способ определения термодинамического единичного импульса

Работа выполнена в рамках Программы повышения конкурентоспособности Томского государственного университета.

© Архипов В. А., Кискин А. Б., Зарко В. Е., Коротких А. Г., 2014.

реализован в программных комплексах (например, «Астра-4» [2]). Для его реализации необходимо задать компонентный состав ТРТ или его эквивалентную формулу, а также энтальпию образования компонентов топлива и энтальпию фазовых переходов, которые не всегда известны для новых твердотопливных композиций. Кроме того, следует отметить, что рассчитанные таким способом значения соответствуют максимальной оценке величины  $J_1$ , без учета потерь импульса, в том числе за счет неполноты сгорания топлива.

Способ прямого определения единичного импульса основан на измерении тяги  $P(t)$  и давления  $p_c(t)$  в камере сгорания модельного ракетного двигателя при сжигании исследуемого образца ТРТ. При этом величину  $J_1$  находят по отношению полного импульса тяги за время  $\tau$  работы двигателя к массе израсходованного за это время топлива [1]:

$$J_1 = \int_0^{\tau} P(t) dt / \int_0^{\tau} G(t) dt,$$

где  $G(t)$  — массовый расход продуктов сгорания.

Известна также методика измерения единичного импульса при помощи баллистическо-

го маятника [3]. Импульс силы, действующей на маятник при сжигании образца ТРТ в ракетном двигателе, пропорционален длине хорды отклонения центра масс маятника от положения равновесия. Недостатками способов прямого измерения единичного импульса являются необходимость использования модельных двигателей с зарядом твердого топлива массой не менее  $0.2 \div 0.5$  кг и потребность в специальном стендовом оборудовании, размещенном во взрывозащитных боксах.

В настоящем сообщении представлена лабораторная экспресс-методика определения единичного импульса ТРТ для образцов топлива массой  $\approx 1 \div 5$  г, основанная на измерении реактивной силы  $F$  оттекающих от поверхности горения ТРТ продуктов газификации [4].

Для определения единичного импульса исследуемого ТРТ разработана лабораторная установка (рис. 1) [5]. Цилиндрический образец исследуемого ТРТ 1 с бронировкой по боковой поверхности 2 в виде кварцевого стакана горизонтально устанавливался на датчик реактивной силы 5. Емкостный датчик для измерения реактивной силы продуктов сгорания, оттекающих от горячей торцевой поверхности образца, размещался в бомбе постоянного объема 3, установленной на основание 4. Электрический сигнал от датчика 5 через электронный преобразователь 6 сигнала в напряжение и через аналого-цифровой преобразователь 7 напряжения в цифровой код поступал на компьютер 8. Перед проведением эксперимента бомбу постоянного объема заполняли инертным газом (азотом или аргоном) из батареи баллонов 9 до заданного давления, которое регистрировалось образцовым манометром 10. По завершению эксперимента выпуск продуктов сгорания образца ТРТ осуществлялся через вентиль 11.

Перед экспериментом образец ТРТ взвешивали на аналитических весах (погрешность  $\pm 0.01$  г), измеряли его высоту  $h_m$  и диаметр  $d_m$ . По этим данным рассчитывали его плотность  $\rho_m$  и площадь торцевой поверхности горения  $S$ . Образец ТРТ поджигали воспламенительным составом при фиксированном давлении  $p_c$ . В процессе горения измеряли реактивную силу  $F$  оттекающих от торцевой поверхности образца продуктов газификации. Для измерения давления использовали тензометрический датчик типа ЛХ-412 (воспламенитель и датчик давления на схеме не показаны). Время сгорания образца ТРТ  $\tau$  определяли по диа-

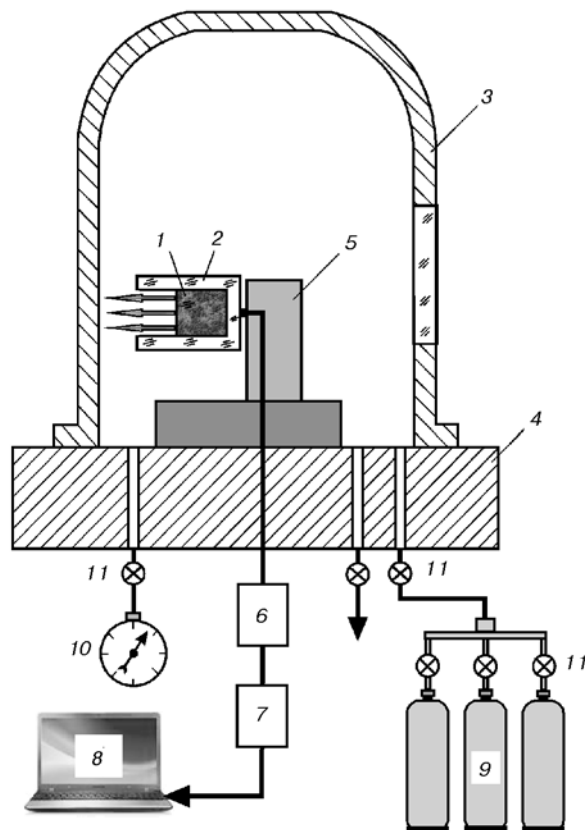


Рис. 1. Схема лабораторной установки для измерения единичного импульса:

1 — образец ТРТ, 2 — кварцевый стакан, 3 — бомба постоянного объема, 4 — основание, 5 — датчик реактивной силы, 6 — преобразователь сигнала, 7 — аналого-цифровой преобразователь, 8 — персональный компьютер, 9 — батарея баллонов, 10 — образцовый манометр, 11 — вентиль

грамме давления  $p_c(t)$ .

Реактивная сила продуктов газификации определяется по соотношению [4]

$$F = \rho u^2 S, \quad (2)$$

где  $\rho$ ,  $u$  — плотность и скорость оттока продуктов газификации. Из закона сохранения массы следует

$$\rho_m u_m = \rho u, \quad (3)$$

где  $u_m$  — линейная скорость горения ТРТ. Из (2), (3) и уравнения состояния для идеального газа  $p_c = \rho R T_c$  следует выражение для реактивной силы:

$$F = \frac{(\rho_m u_m)^2}{p_c} R T_c S.$$

Отсюда можно определить комплекс  $RT_c$  — «силу» пороха [3], который входит в уравнение для расчета единичного импульса:

$$RT_c = \frac{Fp_c}{S(\rho_m u_m)^2}, \quad (4)$$

Величины  $F$ ,  $p_c$ ,  $S$ ,  $\rho_m$  в выражении (4) непосредственно измеряют в эксперименте. Линейную скорость  $u_m$  определяют из экспериментальных данных по времени сгорания  $\tau$  образца известной высоты  $h_m$ :

$$u_m = h_m/\tau. \quad (5)$$

После подстановки (4), (5) в (1) формула для расчета единичного импульса ТРТ принимает вид

$$J_1 = \frac{\tau}{\rho_m h_m} \sqrt{\frac{Fp_c}{S} \frac{2k}{k-1} \left(1 - \frac{p_a}{p_c}\right)^{(k-1)/k}}.$$

Значение показателя адиабаты  $k$  берется из термодинамического расчета или выбирается его среднее значение для близких по составу ТРТ ( $k \approx 1.25$ ). Данная величина незначительно изменяется при варьировании исходного компонентного состава ТРТ [1].

Измерение единичного импульса проведено для модельной композиции ТРТ, содержащей (по массе) 81 % мелкодисперсного перхлората аммония, 14 % горючего-связующего марки НТРВ, 1.5 % нанопорошка алюминия марки Alex, 1.5 % порошка оксида железа  $Fe_2O_3$  и 2 % технологических добавок. Параметры образцов ТРТ:  $d = 10$  мм,  $h_m = 20$  мм,  $\rho_m = 1.60$  г/см<sup>3</sup>.

Результаты определения единичного импульса для трех значений  $p_c$ , осредненные по пяти дублирующим опытам, представлены на рис. 2. Относительная погрешность измерения  $J_1$  при доверительной вероятности 0.95 не превышала 3 %. Здесь же приведены результаты термодинамического расчета  $J_1$  по программе «Астра-4» при  $p_a = 0.1$  МПа (сплошная линия). Анализ полученных данных показывает, что расчетные значения  $J_1$  на 10 ÷ 15 % превышают измеренные. Это связано с тем, что при проведении расчетов принималось, что хи-

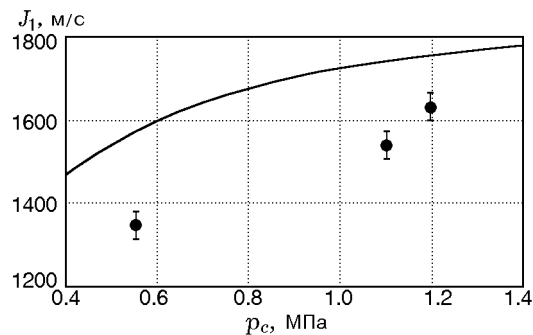


Рис. 2. Единичный импульс модельного ТРТ в зависимости от давления в камере сгорания

мические реакции полностью завершены, а горение происходит без теплотерь. В эксперименте время реагирования газофазных продуктов в бронирующей трубке конечно и его можно варьировать путем изменения длины трубки. Это позволяет моделировать различные условия сгорания топлива в камерах различных размеров.

Таким образом, экспериментально показано, что предложенная методика [5] дает возможность в лабораторных условиях определять единичный импульс ТРТ с использованием малогабаритной аппаратуры и образцов малой массы (не более 5 г).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Соркин Р. Е. Газотермодинамика ракетных двигателей на твердом топливе. — М.: Наука, 1967.
2. Синярев Г. Б., Ватолин Н. А., Трусов Б. Г., Моисеев Г. К. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов. — М.: Наука, 1982.
3. Зельдович Я. Б., Ривин М. А., Франк-Каменецкий Д. А. Импульс реактивной силы пороховых ракет. — М.: Оборонгиз, 1963.
4. Симоненко В. Н., Зарко В. Е. Реактивная сила продуктов сгорания как мера нестационарной скорости горения пороха // Физика горения и взрыва. — 1981. — Т. 17, № 3. — С. 129–132.
5. Пат. 2494394 РФ, МПК G01N 33/22. Способ определения единичного импульса твердого топлива / В. А. Архипов, В. Е. Зарко, А. Б. Кискин, А. Г. Коротких. — Заявл. 26.12.2011; Оpubл. 27.09.2013. Бюл. № 27.