



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: по данным на 09.03.2016 - действует
Пошлина: учтена за 5 год с 27.12.2015 по 26.12.2016

(21), (22) Заявка: **2011153474/15, 26.12.2011**(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
26.12.2011

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: **26.12.2011**(45) Опубликовано: [27.09.2013](#)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **СИМОНЕНКО В.Н. и др. Физика горения и взрыва. 1981, т.17, № 3, с.129-132. RU 2200243 C1, 10.03.2003. RU 2273759 C2, 10.04.2006. US 3266394 A, 16.08.1966. ОРЛОВ Б.В. и др. Термодинамические и баллистические основы проектирования ракетных двигателей на твердом топливе. - М.: Машиностроение, 1968, с.119.**

Адрес для переписки:

**634050, г.Томск, пр. Ленина, 36, НИИ ПММ ТГУ,
директору**

(72) Автор(ы):

**Архипов Владимир Афанасьевич (RU),
Зарко Владимир Егорович (RU),
Кискин Александр Борисович (RU),
Коротких Александр Геннадьевич (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский Томский государственный университет" (ТГУ) (RU),
Учреждение Российской академии наук Институт химической кинетики и горения Сибирского отделения РАН (RU)**

(54) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕДИНИЧНОГО ИМПУЛЬСА ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

(57) Реферат:

Изобретение относится к измерению характеристик твердых топлив для ракетных двигателей. Способ включает измерение реактивной силы продуктов газификации при сжигании образца твердого топлива, бронированного по боковой поверхности, причем измеряют реактивную силу и время полного сгорания образца твердого топлива, помещенного в бомбу постоянного объема, при давлении в диапазоне (0.5÷15)МПа, создаваемом инертным газом, например азотом или аргоном, причем объем бомбы и масса образца находятся в заданном соотношении, а величину единичного импульса определяют по расчетной формуле. Достигается возможность определения единичного импульса при использовании малоразмерных образцов топлива в лабораторных условиях без использования крупногабаритного стендового оборудования и взрывозащищенных боксов. 2 ил.

Изобретение относится к области ракетной техники, в частности к способам измерения характеристик твердых топлив для ракетных двигателей. Изобретение может быть использовано для определения единичного (удельного) импульса новых композиций твердых топлив.

Единичный импульс J_1 является основной энергетической характеристикой топлива. По определению, единичный импульс - это отношение тяги двигателя к секундному массовому расходу продуктов сгорания. Величина единичного импульса определяется зависимостью [1]:

$$J_1 = u_a + \frac{S_a(p_a - p_n)}{G}, \quad (1)$$

где u_a , p_a - скорость истечения и давление продуктов сгорания в выходном сечении сопла площадью S_a ;

p_n - давление окружающей среды (наружное давление);

G - массовый секундный расход продуктов сгорания.

Для "расчетного" сопла ($p_a = p_n$) из (1) следует

$$J_1 = u_a = \sqrt{\frac{2kRT_k}{k-1} \left(1 - \frac{p_a}{p_k}\right)^{\frac{k-1}{k}}}, \quad (2)$$

где $R = c_p - c_v$, $k = c_p / c_v$ - газовая постоянная и показатель адиабаты продуктов сгорания;

c_p , c_v - изобарическая и изохорическая теплоемкости продуктов сгорания;

p_k - давление в камере сгорания ракетного двигателя;

T_k - температура продуктов сгорания в камере двигателя (температура торможения), равная температуре горения топлива ($T_k = T_g$).

Известен расчетно-теоретический метод определения термодинамического единичного импульса с использованием уравнений (1, 2) и расчета T_g , c_p , c_v , R , k по методике [1] с использованием, например, алгоритма "Астра-4" [2]. Под термодинамическим значением J_1 понимается значение единичного импульса при полном отсутствии потерь и условии завершения химических превращений. Для реализации этого способа необходимо знать компонентный состав твердого топлива или его эквивалентную химическую формулу [1], которые в ряде случаев неизвестны для новых твердотопливных композиций.

Известен способ определения единичного импульса, основанный на измерении диаграмм тяги $P(t)$ и давления $p_k(t)$ в камере сгорания модельного ракетного двигателя при сжигании исследуемого образца топлива. При этом величина J_1 находится по отношению полного импульса тяги за время τ работы двигателя к массе израсходованного за это время топлива [1]:

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

где $G(t)$ - массовый секундный расход продуктов сгорания, определяемый по измеренной зависимости $p_k(t)$ из уравнения

$$G(t) = \frac{\varphi p_k(t) S_{\text{сп}}}{\sqrt{RT_k}} \sqrt{k} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}},$$

где ϕ , $S_{кр}$ - коэффициент расхода и площадь критического сечения сопла.

Известен также способ измерения единичного импульса при помощи баллистического маятника, являющегося "абсолютным" прибором [3-5]. Импульс силы, действующей на маятник при сжигании топлива в двигателе, пропорционален длине хорды отклонения центра масс маятника (считая от положения равновесия).

Для измерения единичного импульса в [3] предложен "импульсомер-вертушка", который представляет собой равноплечую балку, с малым трением вращающуюся вокруг вертикальной оси. На одном конце балки установлен модельный ракетный двигатель, а на другом - инертный груз эквивалентной массы. При известном моменте инерции системы величина импульса реактивной силы определяется по измеренной угловой скорости вращения балки.

Наиболее близким по технической сущности является способ, предложенный в [6]. Этот способ основан на измерении реактивной силы F оттекающих от поверхности горения топлива продуктов газификации. Величина F связана с энергетическими характеристиками топлива (в частности, с его массовой скоростью горения).

Недостатками данных способов является необходимость использования модельных двигателей с зарядом твердого топлива не менее (0.2÷0.5) кг и специального стендового оборудования, размещенного во взрывозащитных боксах.

Техническим результатом настоящего изобретения является разработка способа определения единичного импульса твердого топлива в широком диапазоне давлений, основанного на непосредственном измерении комплекса его термодинамических характеристик при сжигании в лабораторных условиях образцов топлива массой (0.5÷10) г.

Технический результат изобретения достигается тем, что разработан способ определения единичного импульса твердого топлива, включающий измерение реактивной силы продуктов газификации при сжигании образца твердого топлива, бронированного по боковой поверхности, и времени его полного сгорания в бомбе постоянного объема при давлении в диапазоне (0.5÷15) МПа, создаваемом инертным газом, например, азотом или аргоном.

Объем бомбы V определяют из соотношения

$$V \geq 100 \frac{R_0 T_H m_m}{M p_{\min}}, \quad (3)$$

а величину единичного импульса определяют по формуле

$$J_1 = \frac{\tau}{\rho_m h_m} \sqrt{\frac{F p_k}{S_m} \frac{2k}{k-1} \left(1 - \frac{p_H}{p_k}\right)^{\frac{k-1}{k}}}, \quad (4)$$

где

$R_0=8.31441$ Дж/(моль·К) - универсальная газовая постоянная;

T_H - температура окружающей среды;

m_m, ρ_m, h_m, S_m - масса, плотность, высота и площадь торцевой поверхности горения образца топлива;

M - молекулярная масса инертного газа;

p_{\min} - минимальное давление из исследуемого диапазона;

τ - время сгорания образца;

F - реактивная сила оттекающих продуктов сгорания;

p_k - давление в бомбе постоянного объема.

Полученный положительный эффект изобретения достигается тем, что при сжигании образцов небольшого размера массой (0.5÷10) г в бомбе постоянного объема при заданном давлении p_k измеряется реактивная сила оттекающих от торцевой поверхности горящего образца продуктов газификации [6, 7]. В соответствии с третьим законом Ньютона, эта сила равна

$$F = \rho_k u^2 S_m, \quad (5)$$

где ρ_k , u - плотность и скорость отекания продуктов газификации.

Из закона сохранения массы следует

$$\rho_m u_m = \rho_k u, \quad (6)$$

где u_m - линейная скорость горения топлива.

Из (5) и (6) и уравнения состояния для идеального газа

$$p_k = \rho_k R T_g \quad (7)$$

можно получить выражение для реактивной силы в виде

$$F = \frac{(\rho_m u_m)^2}{p_k} R T_g S_m, \quad (8)$$

где R - газовая постоянная продуктов сгорания.

Из уравнения (8) можно определить комплекс $(R T_g)$ - "силу пороха" [1], который входит в уравнение для расчета единичного импульса (2):

$$R T_g = \frac{F p_k}{S_m (\rho_m u_m)^2}. \quad (9)$$

Все входящие в (9) величины непосредственно измеряют в эксперименте (F , p_k , S_m , ρ_m). Линейная скорость горения также определяется экспериментально по времени сгорания τ образца заданной высоты h_m

$$u_m = h_m / \tau. \quad (10)$$

Подставляя (9), (10) в (2) получим формулу для определения J_1 (4).

Значение показателя адиабаты k берется из термодинамического расчета или выбирается его среднее значение для близких по составу топлив. Эта величина слабо изменяется при широкой вариации исходного состава топлива.

Выбор диапазона давлений $p_k=(0.5 \div 15)$ МПа, для которого проводят определение единичного импульса топлива, соответствует реальным условиям использования топлива в двигателях [1, 3].

Объем бомбы, в которой проводят сжигание образца твердого топлива, выбирают из условия $p_k = \text{const}$. Увеличение давления в бомбе постоянного объема за счет газопритока от сгорания образца топлива должно быть незначительным. Используя уравнение состояния (7) и полагая, что прирост давления не превышает 1%, можно получить соотношение для определения требуемого объема бомбы (3).

Сущность изобретения поясняется чертежами:

Фиг.1 - схема экспериментальной установки для определения единичного импульса твердого топлива.

Фиг.2 - экспериментальные (точки) и расчетные (сплошная линия) значения единичного импульса в зависимости от давления.

Схема экспериментальной лабораторной установки приведена на Фиг.1 Цилиндрический образец исследуемого твердого топлива 1, забронированный по боковой поверхности 2 с помощью кварцевого (или углеродного) стакана, размещен в бомбе постоянного объема 3. На основании 4 бомбы 3 жестко закреплен емкостной датчик 5 для измерения реактивной силы оттекающих от горячей торцевой поверхности образца 1 продуктов сгорания. Электрический сигнал от датчика реактивной силы 5 через электронный преобразователь сигнала датчика в напряжение 6 и аналогово-цифровой преобразователь напряжения в цифровой код 7 поступает на регистрирующий компьютер 8. Перед проведением эксперимента бомба 3 заполняется инертным газом (азотом) из батареи баллонов 9 до заданного давления, которое регистрируется образцовым манометром 10. Выпуск продуктов сгорания образца после проведения эксперимента осуществляется через вентиль 11.

Перед проведением эксперимента образец взвешивают на аналитических весах с погрешностью ± 0.01 г и измеряют его

высоту h_m и диаметр d_m . По этим данным рассчитывают плотность топлива ρ_m и площадь торцевой поверхности S_m . При заданном давлении p_k образец воспламеняется с помощью нагретой спирали и в процессе его горения измеряют реактивную силу F с помощью датчика 5 и время сгорания образца T по диаграммам давления $p_k(t)$, измеренным с помощью тензометрического датчика давления типа ЛХ-412 (спираль и датчик давления на схеме не показаны).

Измерение единичного импульса проведено для модельной композиции смесового твердого топлива, содержащего 81 мас.% мелкодисперсного перхлората аммония, 14 мас.% горючего-связующего марки НТРВ, 1.5 мас.% нанопорошка алюминия марки ALEX [7], 1.5 мас.% Fe_2O_3 и 2 мас.% технологических добавок. Исследовали образцы топлива диаметром $d_m=10$ мм и высотой $h_m=20$ мм, масса каждого образца (без бронировки) составляла 2.5 г, плотность топлива $\rho_m=1.60$ г/см³.

Результаты определения единичного импульса для трех значений p_k , осредненные по пяти дублирующим опытам, представлены на Фиг.2. Здесь же приведены результаты термодинамического расчета J_1 по программе "Астра-4" (сплошная линия).

Анализ полученных данных показывает, что расчетные значения J_1 на (10÷15)% превышают измеренные. Это связано, по-видимому, с тем, что расчетные данные соответствуют полностью завершённым химическим реакциям. При проведении эксперимента время реагирования газофазных продуктов в бронирующей трубке ограничено, что является более близким приближением к условиям горения топлива в камере сгорания ракетного двигателя, чем в термодинамических расчетах.

Таким образом, экспериментально показано, что при реализации заявляемого способа достигнутый положительный эффект заключается в следующем.

1. Способ позволяет определять единичный импульс топлив, содержащих новые компоненты с неизученными свойствами. Для таких составов полный термодинамический расчет не обеспечивает приемлемой точности. Кроме того, при реализации заявляемого способа реакции в газовой фазе происходят в течение конечного промежутка времени (в отличие от термодинамического расчета), который соответствует времени пребывания газообразных продуктов сгорания топлива в двигателе.
2. Определение единичного импульса проводится в условиях лабораторных испытаний с использованием минимальной массы образца топлива (0.5÷10 г), что особенно важно при исследовании компонентов топлива, имеющих в ограниченном количестве (новые синтезированные вещества).
3. В отличие от известных способов экспериментального измерения J_1 , данный способ не требует дорогостоящего громоздкого оборудования и специальных взрывозащитных стендов для испытания модельных ракетных двигателей массой (0.2÷0.5) кг и более.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соркин Р.Е. Газотермодинамика ракетных двигателей на твердом топливе. - М.: Наука, 1967. - 368 с.
2. Синярев Г.Б., Ватолин Н.А., Трусов Б.Г., Мисеев Г.К. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов. - М.: Наука, 1982. - 263 с.
3. Зельдович Я.Б., Ривин М.А., Франк-Каменецкий Д.А. Импульс реактивной силы пороховых ракет. - М.: Оборонгиз, 1963. - 191 с.
4. Рогулин В.В., Гергель В.Г., Лях Ю.А., Оглих В.В. О методах определения полного импульса тяги РДТТ специального назначения импульсного типа // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сборник научно-технических статей. - Днепропетровск: ГП "КБ "Южное", 2009, Вып.2. - С.80-91.
5. Бескровный И.Б., Рогулин В.В., Микуляк М.В., Лях Ю.А., Льяной В.Н. Выбор стендовых устройств для испытаний импульсных РДТТ // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сборник научно-технических статей. - Днепропетровск: ГП "КБ "Южное", 2010. - С.63-70.
6. 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.
7. Архипов В.А., Бондарчук С.С., Коротких А.Г., Лернер М.И. Технология получения и дисперсные характеристики нанопорошков алюминия // Горный журнал. Спец. выпуск. Цветные металлы. 2006, № 4. - С.58-64.

Способ определения единичного импульса твердого топлива, включающий измерение реактивной силы продуктов газификации при сжигании образца твердого топлива, бронированного по боковой поверхности, отличающийся тем, что измеряют реактивную силу и время полного сгорания образца твердого топлива, помещенного в бомбу постоянного объема, при давлении в диапазоне (0,5÷15)МПа, создаваемом инертным газом, например азотом или аргоном, причем объем бомбы и масса образца находятся в соотношении

$$V \geq 100 \frac{R_0 T_n m_m}{M p_{\min}},$$

а величину единичного импульса определяют по формуле

$$J_1 = \frac{\tau}{\rho_m h_m} \sqrt{\frac{F p_k}{S_m} \frac{2k}{k-1} \left(1 - \frac{p_n}{p_k}\right)^{\frac{k-1}{k}}},$$

где V - объем бомбы;

$R_0=8,31441$ Дж/(моль·К) - универсальная газовая постоянная;

T_n - температура окружающей среды;

m_m , ρ_m , h_m , S_m - масса, плотность, высота и площадь торцевой поверхности горения образца топлива;

M - молекулярная масса инертного газа;

p_{\min} - минимальное давление из исследуемого диапазона;

J_1 - единичный импульс твердого топлива;

τ - время сгорания образца;

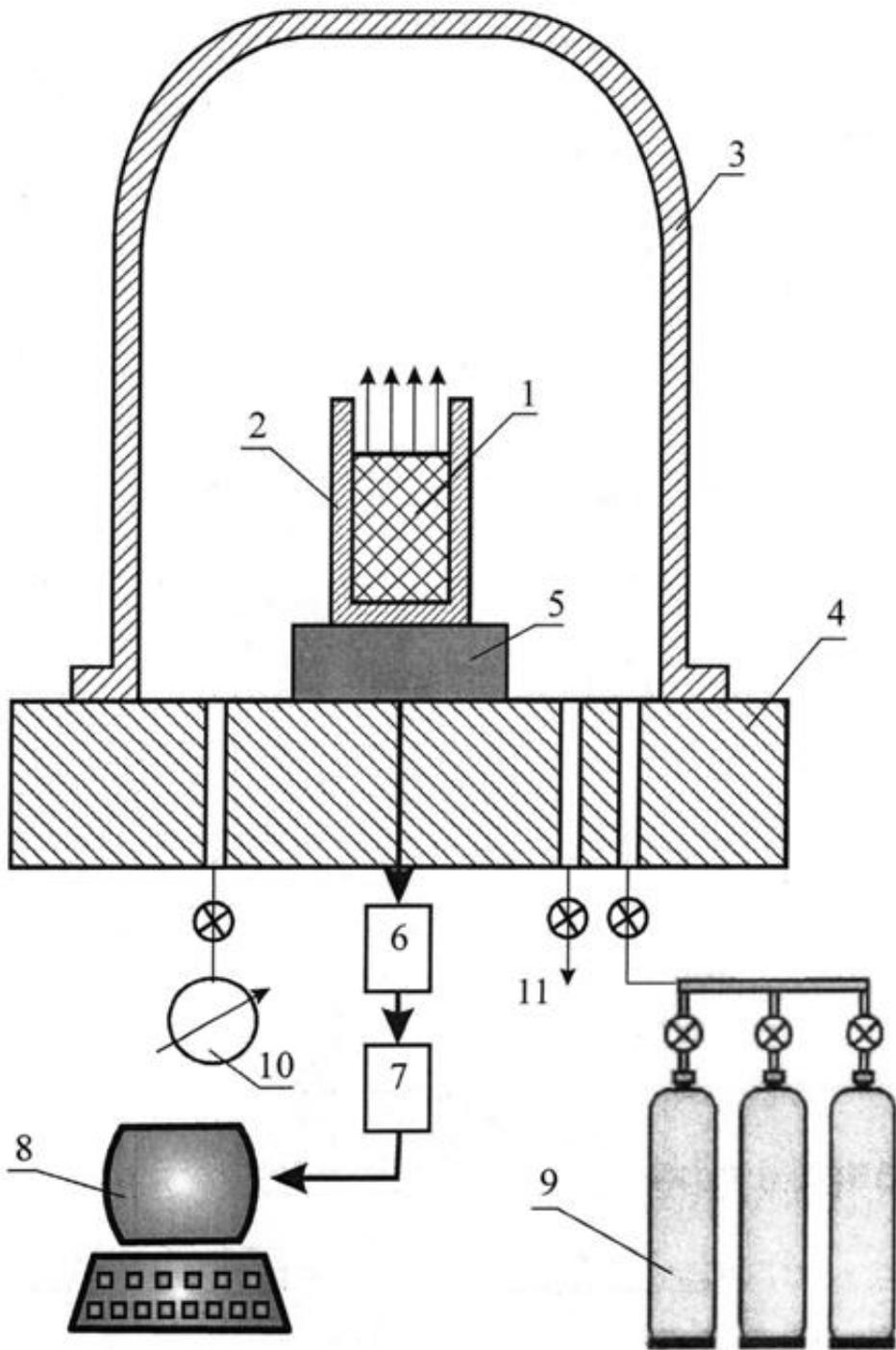
F- реактивная сила оттекающих продуктов сгорания;

p_k - давление в бомбе постоянного объема;

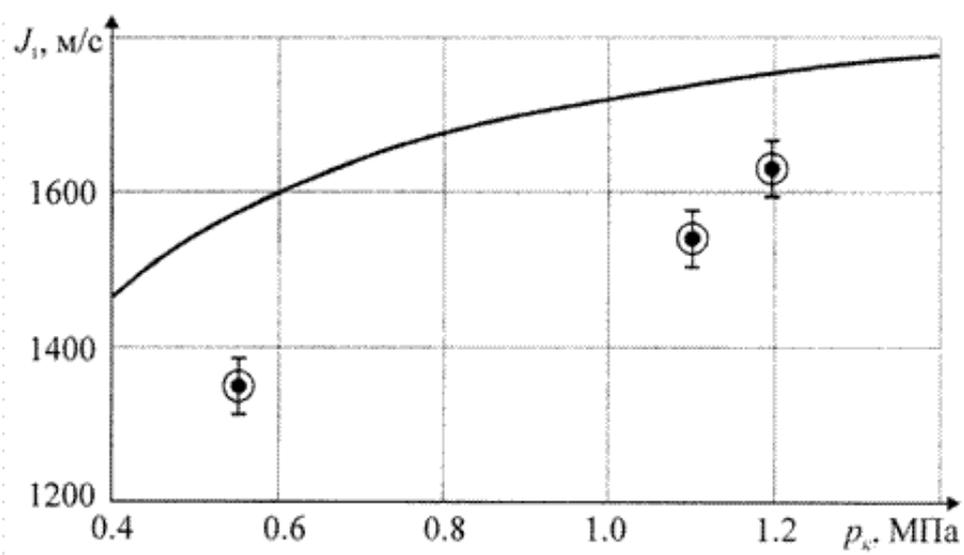
k - показатель адиабаты продуктов сгорания топлива;

p_n - наружное (атмосферное) давление.

РИСУНКИ



Фиг. 1



Фиг. 2