

# Методика оценки удельного импульса на примере твёрдотопливного микродвигателя

А.Б. КИСКИН, В.Н. СИМОНЕНКО

*Институт химической кинетики и горения СО РАН, Новосибирск*  
e-mail: kiskin@kinetics.nsc.ru, sim@kinetics.nsc.ru

В рамках проекта РФФИ по изучению потерь удельного импульса в реактивных твёрдотопливных микродвигателях проведены как прямые измерения удельного импульса, так и оценка удельного импульса с использованием экспериментальных данных о реактивной силе при горении образцов ТРТ. Исследования проводились с использованием смесового твёрдого топлива содержащего 2% металлического горючего. Корпус микродвигателя выполнен из кварца. Объем рабочей камеры 0.07 куб.см. Измерения удельного импульса проводились с помощью датчика реактивной силы. Этот же датчик использовался в экспериментах по горению образцов ТРТ при повышенных давлениях, а полученные данные позволили оценить отношение температуры горения к молекулярному весу образца, что, в свою очередь, позволило рассчитать величину удельного импульса ТРТ.

**Введение.** За последние 50 лет развитие науки и технологий привело к миниатюризации на порядки измерительных датчиков, управляющих систем и других технических устройств. Миниатюризация – количественное уменьшение размеров - в свою очередь ведёт к качественно новым возможностям. Особенно интенсивно технологии МЭМС (микро-электро-механические системы) развивались последние 20 лет. Коснулось это и космических систем. Считается, что создание кластера микроспутников (каждый не более 20 кг) будет дешевле, более многогранной, гибкой и устойчивой при выполнении своих задач (особенно военных). Для корректировки орбиты таких спутников необходимы миниатюрные реактивные системы. Например, в рамках европейской программы Microgugos была предложена матрица твёрдотопливных микродвигателей выполненных в виде микросхемы. Созданием и изучением подобных микроотрастеров - реактивных твёрдотопливных микродвигателей - занимаются во многих странах. В настоящей работе представлены некоторые результаты исследований проведённых в рамках проекта РФФИ по изучению потерь удельного импульса  $I_{sp}$  микроотрастеров. При работе реактивного двигателя потери импульса реактивной силы возникают в результате теплоотдачи стенкам камеры сгорания, за счёт несовершенства соплового блока и неполноты химического реагирования. Последний тип потерь обусловлен незавершенностью газофазных реакций как в результате малости времени пребывания газа в камере сгорания, так и пониженной скоростью реакций вследствие значительного теплоотвода в стенки камеры (и соответствующего понижения температуры горения).

**Методика и результаты.** Модельный микроотрастер представляет собой полый кварцевый цилиндр, закрытый с двух сторон кварцевыми же дисками – дном и сопловым блоком. Сопло диаметром 500 - 800 микрон прожигалось лазером с последующей механической доработкой. Цилиндр камеры двигателя имеет высоту 5 мм, внешний диаметр 8.2 мм и внутренний 4.55 мм. Толщина дисков 2.5 мм. Внутри камеры двигателя вдоль поверхности соплового диска проложены провод поджига и термопара. В камере объёмом 0.07 см<sup>3</sup> помещается 0.11 – 0.12 г модельного топлива. В состав модельного смесового топлива входят мелкодисперсный ПХА - 81%, связка НТРВ - 14 %, Алекс - 1.5 %, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 1.5 % и технологические добавки - 2 %.

Для данной системы экспериментально были определены теплопотери на нагрев корпуса микроотрастера и на базе математической модели проведена оценка их влияния на величину удельного импульса [1] (рис.1).

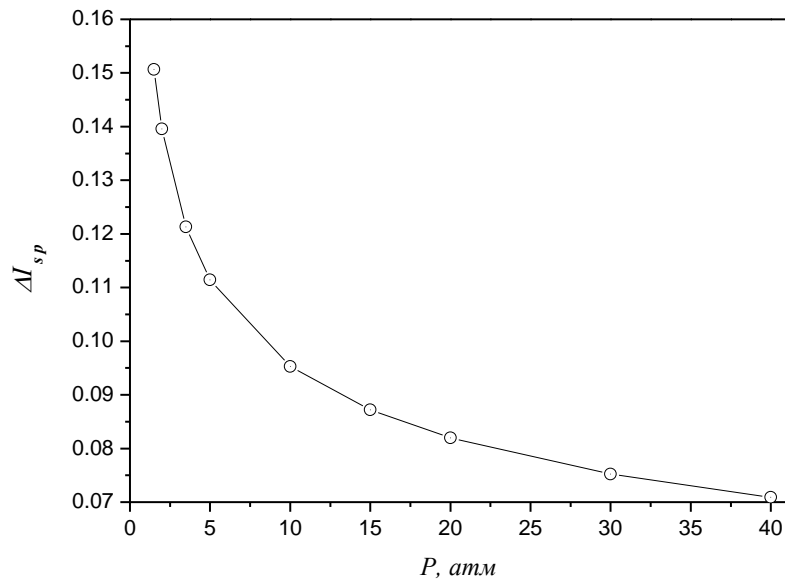


Рис. 1. Относительные потери удельного импульса  $I_{sp}$ , обусловленные теплотерями на прогрев корпуса микротрастера.

Для определения величины потерь удельного импульса реактивной силы за счёт несовершенства соплового блока и неполноты химического реагирования необходимо сравнить измеряемый импульс с практически максимально достижимым в идеальных условиях – без потерь. С помощью датчика реактивной силы [2] были получены данные по величине удельного импульса  $I_{sp}$  при работе микротрастеров с различными диаметрами сопла. На рис.2 приведён пример экспериментальной записи измеряемых величин – реактивной силы  $F$ , температуры газа внутри камеры двигателя вблизи соплового отверстия -  $T_g$ . Сигнал фотодатчика демонстрирует светимость струи продуктов горения.

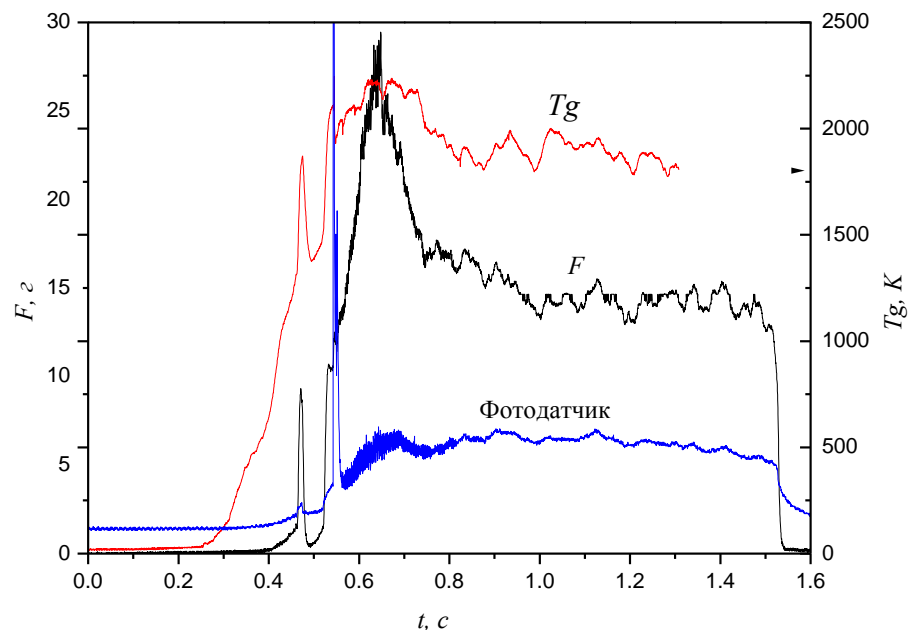


Рис. 2. Пример экспериментальной регистрации при работе микротрастера. Диаметр сопла 630 микрон.

Экспериментально величина удельного импульса  $I_{sp}$  микротрастера определяется интегрированием уровня реактивной силы по времени с последующей нормировкой на массу  $m$  сгоревшего топлива.

$$I_{sp} = \frac{1}{m} \int F(t) dt$$

В качестве оценки максимально достижимого удельного импульса можно использовать данные термодинамических расчётов, однако, это будет оценка сверху, изначально завышенная для микротрастеров. Был предложен иной, экспериментальный метод. Суть метода заключается в измерении уровня реактивной силы оттекающих от поверхности горения продуктов газификации топлива горящего при давлениях, реализуемых в камере микродвигателя. Зная уровень реактивной силы можно определить величину отношения температуры горения  $T_g$  к молекулярному весу  $M$  продуктов горения из зависимости [3,4]:

$$F = \frac{(\dot{m})^2}{P} \cdot \frac{RT_g}{M} \cdot S$$

Здесь  $P$  – давление,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $S$  – площадь сечения образца. Именно значение  $T_g/M$  и используется для расчёта удельного импульса.

$$I_{sp} = \frac{1}{g} \sqrt{\frac{RT_g}{M} \cdot \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \left(1 - \left(\frac{P_o}{P_c}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}\right)}, \quad \gamma = \frac{c_p}{c_v}.$$

Здесь  $P_o$  и  $P_c$  – окружающее давление и давление в камере микротрастера. При вычислениях дополнительно требуется величина  $\gamma$  отношения теплоёмкостей при постоянном давлении  $C_p$  и постоянном объёме  $C_v$ . Параметр  $\gamma$  определялся с помощью термодинамических расчётов, поскольку являлся слабопеременным и не может быть измерен в непосредственно проведённых экспериментах. Полученные экспериментальные данные и термодинамические расчёты представлены на рис.3.

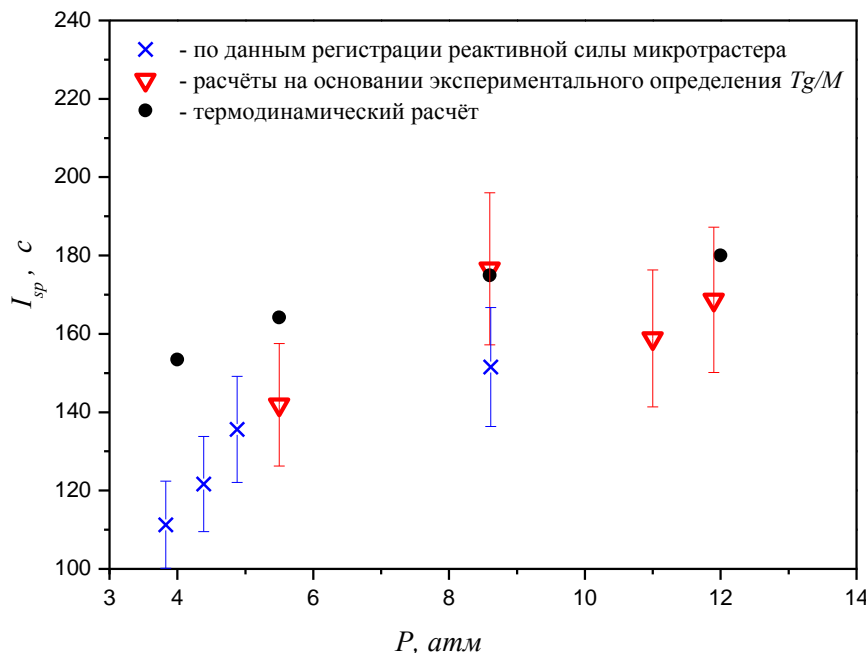


Рис. 3. Различные оценки удельного импульса.

**Обсуждение и выводы.** Действительно, расчётная термодинамическая оценка удельного импульса является верхней оценкой. Экспериментальный же метод определения максимально достижимого на практике удельного импульса выдал значения, близкие к регистрируемым у микротрастеров. Их пределы точности измерения перекрываются. Это означает, что величина суммарных энергетических потерь в таком микродвигателе невелика и не превосходит 10 – 12 %. Действительно, на рис. 1 видно, что влияние теплотерь падает с ростом рабочего давления в камере и при давлении большем 8 атм составляет менее 10%. Более того, отличие измеренного удельного импульса от термодинамически рассчитанного невелико и с ростом давления попадает в коридор точности измерения. В [1] показано, что уменьшение размеров микродвигателя ведёт к значительному росту теплотерь, и, наоборот, в более крупных системах роль теплотерь снижается. Отсюда следует, что методика экспериментального определения импульса может применяться для оперативной оценки величины удельного (единичного) импульса твёрдого топлива на новых компонентах либо проведения сравнительного анализа разных топлив и их модификаций.

Данная работа выполнена в рамках проекта 06-08-01298-а финансируемого РФФИ – Российским Фондом Фундаментальных Исследований.

#### **Список литературы.**

[1] Alexander. B. Kiskin, Vladimir. N. Simonenko, Lev. K. Gusachenko, Oleg. G. Glotov, and Vladimir. E. Zarko Experimental Study of Microthrustor Heat Loss // *Advancements in Energetic Materials and Chemical Propulsion* (eds. K. Kuo, K. Hori), Begell House, NY, 2008, pp. 879-894.

[2] Михеев В.Ф., Борин С.М. Измерение массовой скорости твердых ВВ // *ФГВ*. 1973. Т. 9, № 2. С. 327-329.

[3] Симоненко В.Н., Зарко В.Е. Реактивная сила продуктов сгорания как мера нестационарной скорости горения пороха // *ФГВ*. 1981. Т. 17, № 3. С. 129-132.

[4] Кискин А.Б., Симоненко В.Н. Особенности применения метода регистрации реактивной силы для измерения нестационарной скорости горения // *ФГВ*. 2000. Т.36, №1. С. 52-58.