

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЯГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛЬНОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ПВРД НА ТВЕРДОМ ГОРЮЧЕМ В УСТАНОВКЕ КРАТКОВРЕМЕННОГО ДЕЙСТВИЯ

С.В. Лукашевич<sup>1</sup>, А.Н. Шиплюк<sup>1,2</sup>, П.А. Антонов<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия*  
<sup>2</sup> *Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*

При исследовании процессов горения в камерах сгорания (КС) прямооточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД) основное внимание уделяется определению их тяговых характеристик. Основным способом определения тяговых характеристик является непосредственное измерение тяги создаваемой камерой сгорания, при этом время рабочего режима составляет несколько секунд. Другим способом определения тяговых характеристик является расчет импульса струи истекающей через звуковое сопло по известным параметрам потока на срезе сопла (давление, температура, состав газа). Данная работа посвящена определению тяговых характеристик камеры сгорания ПВРД на твердом горючем в установке кратковременного действия. В условиях одного эксперимента проводится сравнение двух способов определения тяги: непосредственного измерения тяги при помощи датчика силы и расчет импульса струи истекающей через звуковое сопло.

**Экспериментальная установка**, предназначенная для исследования горения твердого горючего (ТГ) в прямооточной камере сгорания, собрана на базе Модельной Аэродинамической Установки (МАУ) ИТПМ СО РАН и позволяет измерять тягу создаваемую камерой сгорания в конфигурации с присоединенным трубопроводом. Для того, чтобы исключить влияние импульсов струй рабочих газов на входе в камеру сгорания, выбрана схема с безимпульсным подводом рабочих газов, которая предполагает их подвод перпендикулярно вектору создаваемой камерой сгорания тяги. Установка оснащена огневым подогревателем, который позволяет получать рабочий газ с температурой до 1700 К и давлением до 20 бар. Расход рабочего газа до 1 кг/с. Массовая доля кислорода в рабочем газе 20 – 23 % обеспечивается подводом дополнительного кислорода. Через дозвуковое сопло рабочий газ подается в кольцевой канал, где на пилоне установлен образец твердого горючего, выполненный в виде цилиндра диаметром 20 или 32 мм и длиной 40 мм. Горение и унос массы ТГ осуществляются по внешней поверхности образца. Дожигание продуктов газификации ТГ происходит в камере дожигания (КД) внутренний диаметр которой составляет 40 мм. КД оснащена измерительными для измерения температуры в канале или давления на стенке, так же в выходной секции КД установлена гребенка приемников полного давления. Выхлоп продуктов горения осуществляется через профилированное звуковое сопло с диаметром критического сечения 17 мм. Для измерения тяги установка оборудована тензодатчиком силы ВСА-50.

**Обработка экспериментальных данных.** Секундный среднemasсовый расход образца ТГ за режим определяется как

$$Q_{ТГ\text{средн}} = \Delta m / t_{гор}, \quad (1)$$

где  $\Delta m$  – изменение массы образца за режим,  $t_{гор}$  – время горения образца. Изменение массы образца определяется при помощи контрольного взвешивания до и после пуска на лабораторных весах с точностью 0,02 г. Время горения образца  $t_{гор}$  определяется из гра-

фика полного давления и в данных экспериментах составляло 1 с. Суммарная погрешность определения секундного среднемассового расхода ТГ составляет 2%.

Расчет тяги по импульсу струи выходного звукового сопла производился при помощи формулы для секундного импульса выраженного через число Маха и давление.

$$J = S \cdot P \cdot M^2 \cdot k + S \cdot (P - P_{атм}), Н \quad (2)$$

где  $J$  – секунднй импульс струи звукового сопла,  $S$  – площадь критического сечения сопла ( $S = 227 \text{ мм}^2$ ),  $P$  – статическое давление в критическом сечении сопла,  $P_{атм}$  – атмосферное давление,  $M$  – число Маха в критическом сечении сопла ( $M = 1 \pm 0,01$ ),  $k$  – показатель адиабаты, определяемый при помощи программы термодинамического расчета «Терра» для теоретического состава продуктов горения. Суммарная погрешность определения импульса звукового сопла составляет 4 %.

Для измерения тяги, создаваемой модельной камерой сгорания, использовался тензодатчик силы ВСА-50 рассчитанный на нагрузку 500 Н. Перед каждым экспериментом датчик тарировался при помощи эталонных гирь весом  $5 \pm 0,001$  кг. Суммарная погрешность измерения тяги включая погрешность тарировки составляла 1 %.

Для оценки эффективности твердого горючего по результатам экспериментов рассчитывается удельное приращение импульса выходного звукового сопла  $\Delta I$  которое определяется как разница секунднх импульсов, полученных в пусках с горением и без горения образца отнесенная к среднему расходу ТГ.

$$\Delta I = \Delta J / Q_{ТГ}, м/с \quad (3)$$

где  $Q_{ТГ}$ , г/с – расход ТГ;  $\Delta J = J_{гор} - J_{хол}$ , Н;  $J_{гор}$  – секунднй импульс, полученный в «горячем» пуске с горением ТГ;  $J_{хол}$  – секунднй импульс, полученный в «холодном» пуске без образца ТГ. В данной работе секунднй импульс определялся двумя способами: непосредственным измерением тяги создаваемой камерой сгорания и расчетом импульса струи истекающей через звуковое сопло по известным параметрам потока (давление, температура, состав газа). Удельный импульс создаваемый при горении ТГ определялся по результатам двух пусков с идентичными параметрами потока в форкамере установки. В «горячем» пуске происходило горение образца исследуемого горючего, в «холодном» пуске вместо образца ТГ устанавливалась стальная модель, для того чтобы обеспечить идентичность течения в канале образца. Таким образом отличия между «горячим» и «холодным» пусками заключались только в наличие тепло и массоподвода в результате горения твердого горючего.

**Результаты экспериментов.** В первой серии экспериментов проводились испытания образцов ТГ из полипропилена. Параметры рабочего газа на входе в канал образца:  $P_0 = 520 - 770$  кПа,  $T_0 = 1340 - 1430$  К. В экспериментах использовались образцы диаметром  $d = 32$  мм и длиной  $L = 40; 80$  мм. На рис. 1 представлены результаты определения тяги КС двумя способами, видно, что значение тяги в «горячем» пуске на 60 Н превышает значение тяги в «холодном» пуске. Следует отметить, что происходит завышение показаний датчика силы к концу пуска примерно на 6 % по отношению к рассчитанной величине тяги. Это связано с прогревом установки, поэтому для сравнения результатов измерений двумя способами осреднение определяемых сил проводилось в интервале времени  $\Delta t = 0,8 - 1,0$  с. Это так же означает, что при измерении тяги в установках продолжительного действия необходимо определять влияние прогрева установки во время пуска и учитывать его.

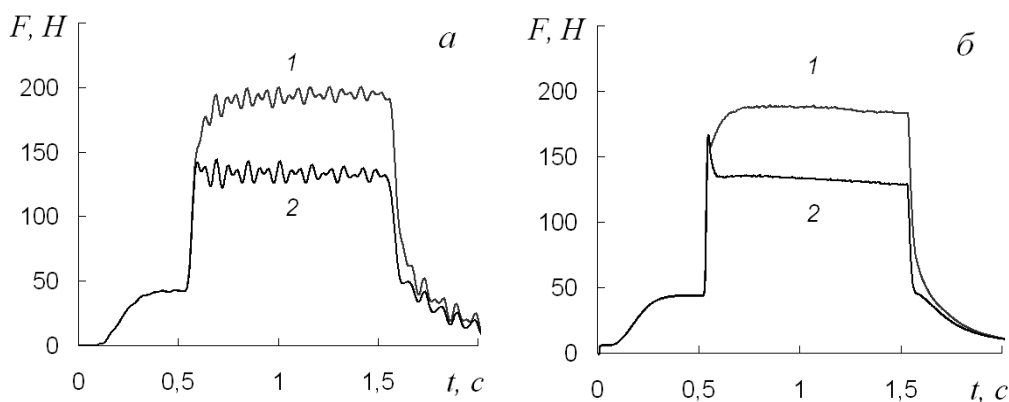


Рис. 1. Тяга камеры сгорания. а – измеренная, б – рассчитанная,  
1 – «горячий» пуск, 2 – «холодный» пуск

**Заключение.** Всего было проведено 12 пусков и исследовано 6 образцов ТГ (3 образца из полипропилена и 3 образца с высоким содержанием к-фазы). Для полипропилена прирост удельного импульса составил  $\Delta I = 930 - 1150$  м/с, для ТГ с к-фазой –  $\Delta I = 730 - 940$  м/с. Проведено сравнение двух способов определения тяговых характеристик для двух типов твердых горючих (полипропилена и ТГ с высоким содержанием к-фазы). Проводилось непосредственное измерение тяги создаваемой КС и выполнялся расчет тяги по импульсу струи истекающей через звуковое сопло по известным параметрам потока (давление, температура, состав газа). Разница в результатах определения секундного импульса КС двумя способами во всех пусках не превышала 2 %. Разница в значениях прироста удельного импульса полученного двумя способами для полипропилена составила 0,1 – 7 %, для ТГ с к-фазой 7 – 14 %.

Работа подготовлена при частичной поддержке программы фундаментальных исследований президиума РАН №56 «Фундаментальные основы прорывных технологий в интересах национальной безопасности».