

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЖРДМТ ТЯГОЙ (0,1-1,0) Н СО СТРУЙНОЙ СХЕМОЙ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ

© 2011 В. Е. Нигодюк, А. В. Сулинов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

В результате расчетно-теоретического и экспериментального исследований показано, что основной причиной низкой экономичности двухкомпонентных ЖРДМТ тягой (0,1...1,0) Н на самовоспламеняющихся компонентах топлива со струйной схемой смесеобразования является низкая эффективность жидкофазного смешения компонентов. Предложен и экспериментально подтвержден метод повышения энергетической эффективности двухкомпонентных ЖРДМТ тягой (0,1...1,0) Н на самовоспламеняющихся компонентах топлива со струйной схемой смесеобразования за счет интенсификации жидкофазного смешения компонентов с помощью предкамерного устройства.

ЖРДМТ, жидкофазное смешение компонентов, струйная схема смесеобразования, предкамера, интенсификация.

Двухкомпонентные жидкостные ракетные двигатели малой тяги (ЖРДМТ) на самовоспламеняющихся компонентах топлива тягой от 0,1 до 1 Н представляют несомненный интерес для разработчиков систем ориентации и стабилизации космических аппаратов (КА) [1], поскольку данные исполнительные органы обеспечивают как высокую точность управления КА, так и вполне удовлетворительную динамику выполнения операций по управлению летательным аппаратом.

По сравнению с ЖРДМТ тягой от 10 до 400 Н данный класс двигателей имеет свои отличительные особенности, которые необходимо учитывать при их проектировании:

- наличие одного смесительного элемента;
- использование в качестве форсунок, прежде всего струйных форсунок - капилляров с внутренним диаметром 0,15...0,3 мм и с большими относительными длинами - более 20;
- проблемы с обеспечением стабильности гидравлических характеристик капиллярных смесительных элементов из-за значительных тепловых потоков в смесительную головку и возможной облитерации капиллярных каналов;
- сложности в эффективной организации жидкофазного смешения компонентов топлива;

- значительные потери удельного импульса тяги из-за неадиабатности процессов в камере;

- особые условия организации тепловой защиты смесительной головки и стенок камеры сгорания.

Уменьшение количества смесительных элементов в системе смесеобразования до одного - двухструйного, состоящего из капилляров, значительно усложняет проблему эффективной организации рабочего процесса в камере сгорания и существенно снижает коэффициент камеры сгорания, в особенности для тяг (0,1...0,2) Н.

Анализ результатов исследований взаимодействия самовоспламеняющихся жидких топлив [2] показывает, что эффективным путем получения высокой полноты сгорания является обеспечение полного жидкофазного смешения компонентов.

Процесс полного жидкофазного смешения в струйных схемах смесеобразования будет лимитироваться следующими граничными условиями:

- периодом индукции жидкофазных реакций самовоспламеняющихся компонентов $\tau_i^{жф}$ [3]:

$$\frac{(\delta_z + \delta_{ок})}{0,135 [v_z^2 + v_{ок}^2 - 2v_z v_{ок} (\varphi_z + \varphi_{ок})]^{1/2}} \leq \tau_i^{жф}, \quad (1)$$

- условием струйного истечения компонентов топлива [4]:

$$We_{z,ок} = \frac{\rho_{z,ок} v_{z,ок}^2 d_{z,ок}}{\sigma_{z,ок}} \geq 10, \quad (2)$$

- условием отсутствия гидродинамического распада пленок компонентов топлива в процессе их смешения в жидкой фазе [5]:

$$\delta_{z,ок} \geq \frac{0,125 d_{z,ок}^2 \sin^2 \varphi_{z,ок}}{r_p (1 + \cos^2 \varphi_{z,ок} - 2 \cos \varphi_{z,ок})}. \quad (3)$$

В уравнениях (1)...(3) δ и v – толщина и скорость пленки компонента; φ – угол наклона струи или пленки компонента к оси камеры; ρ и σ – плотность и коэффициент поверхностного натяжения компонента; d – внутренний диаметр капилляра; $r_p \approx 0,0835 d We$ – радиус гидродинамического распада пленки компонента; индексы: z – горючее, $ок$ – окислитель.

Используя уравнения указанных граничных условий, было проведено расчетно-теоретическое исследование по определению области полного жидкофазного смешения в зависимости от диаметра капилляров и тяги двигателя.

Результаты расчетно-теоретического исследования зависимости внутреннего диаметра капилляра, обеспечивающего полное жидкофазное смешение компонентов, от тяги для одной из возможных схем смесеобразования со сталкивающимися струями (углы наклона струй горючего и окислителя к оси камеры - $\varphi_z = 49^\circ$, $\varphi_{ок} = 26^\circ$) при коэффициенте избытка окислителя $\alpha_{ок} = 0,6$ представлены на рис. 1. На рисунке показаны рассмотренные выше граничные условия: 1 – ограничение периодом индукции жидкофазных реакций, в исследовании период индукции жидкофазных реакций принимался равным $\tau_i^{жф} = 1 \cdot 10^{-4}$ с; 2 - условие струйного истечения компонентов топлива; 3 - условие отсутствия гидродинамического распада пленок компонентов топлива в процессе их смешения в жидкой фазе.

Анализ результатов расчетно-теоретического исследования показывает,

что лишь капилляры внутренним диаметром менее 0,1 мм позволяют обеспечить полное жидкофазное смешение компонентов в диапазоне тяг от 0,15 до 1,0 Н. При тяге двигателя менее 0,15 Н полное жидкофазное смешение компонентов обеспечить не удастся даже при сколь угодно малом диаметре капилляров, что требует поиска других путей интенсификации смешения компонентов в жидкой фазе.

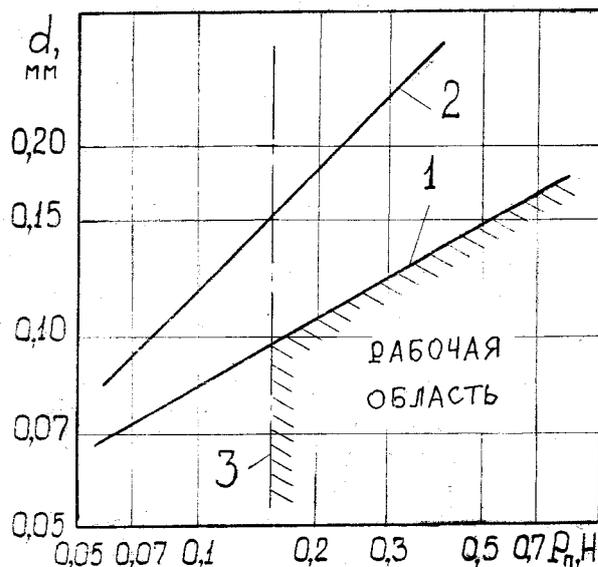


Рис. 1. Определение области (рабочей области) полного жидкофазного смешения компонентов топлива

Для подтверждения расчетных данных был разработан и изготовлен экспериментальный образец двигателя, выполненного на основе рассмотренной струйной схемы смесеобразования, и проведено его экспериментальное исследование.

Экспериментальные исследования данного двигателя подтверждают расчетные данные (рис. 2, кривая 1 - двигатель без предкамеры): коэффициент камеры сгорания φ_k с уменьшением тяги ЖРДМТ в диапазоне от 1,0 до 0,1 Н существенно падает, поскольку при этом уменьшается доля смешиваемых в жидкой фазе компонентов топлива. Тяга рассматриваемого двигателя в процессе эксперимента изменялась путем изменения давления компонентов на входе в двигатель с обеспечением постоянства коэффициента избытка окислителя: $\alpha_{ок} = (0,55...0,65)$.

Реализация пути повышения энергетической эффективности ЖРДМТ за счет использования капилляров менее 0,1 мм вызывает большие трудности как с технологической, так и с эксплуатационной точек зрения.

В настоящей работе с целью повышения энергетической эффективности ЖРДМТ за счет интенсификации жидкофазного смешения компонентов предложен путь использования предкамерного устройства [6]. Предкамера была выполнена в виде плоского диффузорного щелевого канала, что позволяло для данной схемы смесеобразования взаимодействие самовоспламеняющихся компонентов топлива в жидкой фазе в завершающей стадии организовать на плоской стенке предкамеры. При этом исполнение плоского канала предкамеры в виде диффузора не оказывало существенного влияния на рабочий процесс в камере сгорания.

Результаты экспериментального исследования двигателя с предкамерой (рис. 2, кривая 2 – двигатель с предкамерой) подтверждают возможность интенсификации жидкофазного смешения компонентов с помощью предкамеры. В частности, при тяге двигателя 0,2 Н прирост значения коэффициента камеры сгорания ЖРДМТ с предкамерой по сравнению с исходным вариантом двигателя без предкамеры превысил 50%.

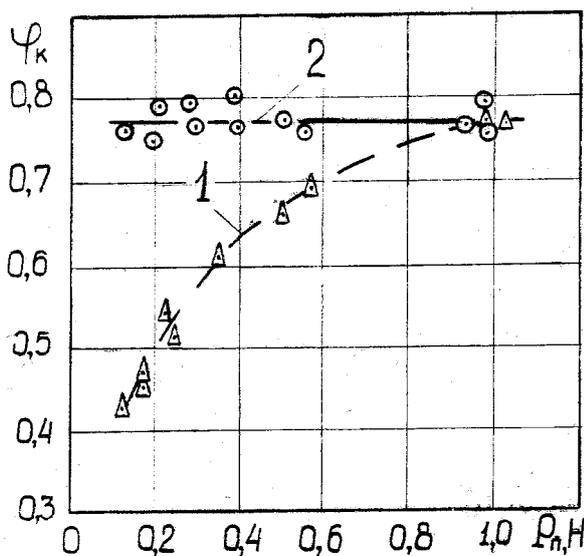


Рис. 2. Результаты экспериментального исследования двигателя без предкамеры (1) и с предкамерой (2)

Проведенные расчетно-теоретическое и экспериментальное исследования показали, что основной причиной низкой экономичности ЖРДМТ тягой 0,1...1,0 Н на двухкомпонентном СЖРТ со струйной схемой смесеобразования является низкая эффективность жидкофазного смешения компонентов. В качестве одного из возможных путей повышения энергетической эффективности двухкомпонентных ЖРДМТ тягой 0,1...1,0 Н на СЖРТ со струйной схемой смесеобразования за счет интенсификации жидкофазного смешения компонентов в настоящей работе предложено использование предкамерного устройства.

Библиографический список

1. Шерстянников, В.А. ЖРД орбитальных станций и космических аппаратов длительного функционирования [Текст] / В.А. Шерстянников // Двигатель, 2003. № 1. - С. 32-33.
2. Дубинкин, Ю.М. Проблемы организации рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей малой тяги [Текст] / Ю.М. Дубинкин, В.Е. Нигодюк // Изв. ВУЗов. Авиационная техника, 1993. № 2. - С. 71-74.
3. Дубинкин, Ю.М. К теории смесеобразования гипергольных топлив [Текст] / Ю.М. Дубинкин // Тепловые процессы и свойства рабочих тел ДЛА: межвуз. сб. Вып. 2. - Казань: КАИ, 1978. - С. 27-33.
4. Дунский, В.Ф. О переходе от капельного истечения жидкости к струйному истечению [Текст] / В.Ф. Дунский, Н.В. Никитин // ПМТФ, 1974. № 5. - С. 42-48.
5. Дитякин, Ю.Ф. Распыливание жидкостей [Текст] / Ю.Ф. Дитякин, Л.А. Клячко, Б.В. Новиков [и др.] – М.: Машиностроение, 1977. - 208 с.
6. Нигодюк, В.Е. Перспективы применения предкамер в ЖРДМТ на самовоспламеняющихся компонентах топлива [Текст] / В.Е. Нигодюк, А.В. Сулинов // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Материалы междунар. науч.-техн. конф. - Ч.1. - Самара: СГАУ, 2009. - С. 120-122.

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF LIQUID ROCKET ENGINE OF SMALL THRUST (0,1-1,0) N WITH JET SCHEME OF MIXING

©2011 V. E. Nigodjuk, A. V. Sulinov

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

As a result of theoretical and experimental studies have shown that the main reason for the low efficiency of two-component liquid-propellant thrusters (0,1 ... 1) N on hypergolic propellants with jet mixing scheme is the low efficiency of liquid-phase mixing of the components. Proposed and experimentally investigated a method for increasing the energy efficiency of two-component liquid-propellant thrusters (0,1 ... 1) N on hypergolic propellants with jet mixing scheme due to the intensification of liquid-phase mixing of the components with predkamernogo device.

Liquid rocket engine thrusters, liquid-phase mixing components, jet mixing scheme, antechamber, intensification.

Информация об авторах

Нигодюк Валентин Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел. (846) 335-59-21. E-mail: ke_src@ssau.ru. Область научных интересов: исследование рабочего процесса в двигателях летательных аппаратов.

Сулинов Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, старший научный сотрудник Научно-исследовательского центра космической энергетики. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел. (846) 335-59-21. E-mail: ke_src@ssau.ru. Область научных интересов: исследование рабочего процесса в двигателях летательных аппаратов.

Nigodjuk Valentin Evgenievich, candidate of technical science, associate professor of the department of theory engines letatel-governmental apparatus, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 335-59-21. E-mail: ke_src@ssau.ru. Area of research: research of the working process in motion aircraft.

Sulinov Alexander Vasilyevich - candidate of technical science, associate professor of the department of theory engines letatel-governmental apparatus and senior researcher Scientific research center of space energy, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 335-59-21. E-mail: ke_src@ssau.ru. Area of research: research of the working process in the engines of the aircraft.