

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И СТАБИЛЬНОСТИ ПОДАЧИ ТОПЛИВА В КАМЕРУ СГОРАНИЯ ЖРД СТРУЙНЫМИ ФОРСУНКАМИ

© 2024

Ю. И. Агеенко доктор технических наук, профессор кафедры техники и технологии;
Технологический университет имени дважды героя Советского Союза
лётчика-космонавта А.А. Леонова, г. Королёв;
yi.ageenko@mail.ru

А. С. Бубнова студентка кафедры техники и технологии;
Технологический университет имени дважды героя Советского Союза
лётчика-космонавта А.А. Леонова, г. Королёв;
annette.bubnova@mail.ru

Проанализированы различные конфигурации струйных форсунок, а также их конструктивное исполнение. Рассмотрено влияние входной фаски струйных форсунок на их коэффициент расхода и дальнобойность. Определены оптимальные конструктивные параметры струйных форсунок. Показано, что сверление прецизионных микроотверстий форсунок целесообразно проводить с использованием высокоточного трёхмерного электроэрозионного оборудования.

Камера сгорания; форсунка; жидкостный ракетный двигатель; жидкостный ракетный двигатель малой тяги

Цитирование: Агеенко Ю.И., Бубнова А.С. Повышение эффективности и стабильности подачи топлива в камеру сгорания ЖРД струйными форсунками // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 2. С. 7-13. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-2-7-13

Доставка компонентов топлива (КТ) в камеру сгорания (КС) жидкостного ракетного двигателя (ЖРД), в том числе ЖРД малой тяги (ЖРДМТ), осуществляется в основном с помощью форсунок. Обычно используются два типа форсунок: струйные и центробежные. Струйная форсунка подает топливо в КС в виде струи, а центробежная форсунка в виде пелены конуса распыливания. Достоинствами струйных форсунок является простота изготовления и большая пропускная способность – количество топлива, подаваемого одной форсункой в единицу времени. Во многих учебниках по ЖРД приведены различные конфигурации струйных форсунок (рис. 1) [1 – 3].

В ЖРД (ЖРДМТ) струйные форсунки могут использоваться как для организации рабочего процесса преобразования топлива в КС, так и для организации плёночного охлаждения стенок КС и сопла. Организация смесеобразования компонентов топлива в КС осуществляется струйными форсунками с пересекающимися под углом струями или плёнками, образованными на преграде (дефлекторе), в результате соударения струи с ней (рис. 1, б) [2].

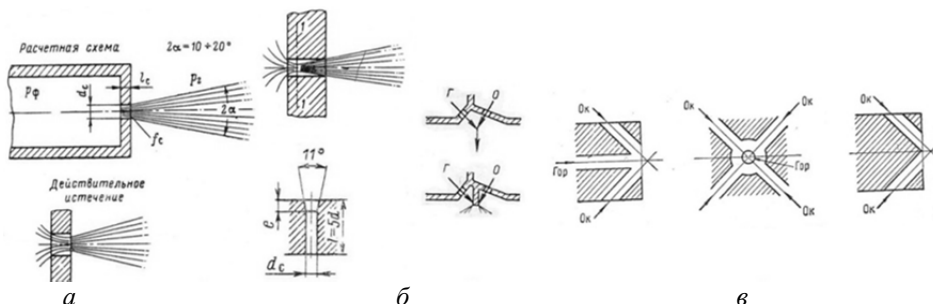


Рис. 1. Различные конфигурации струйных форсунок:
а – истечение компонента из струйной форсунки; б – струйные форсунки с пересекающимися на дефлекторе плёнками; в – принципиальные схемы элементов струйного распыла компонентов топлива

Плѐночное охлаждение стенки КС осуществляется в результате формирования на ней плѐнки компонента топлива после соударения топливной струи со стенкой КС (рис. 2) [4].

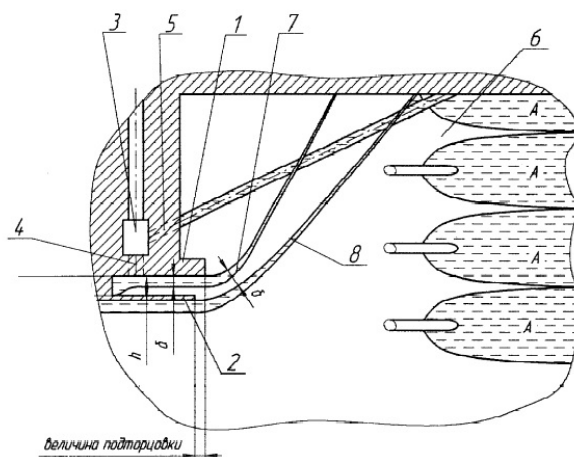


Рис. 2. Плѐночное охлаждение стенки КС:

1 – наружная центробежная форсунка; 2 – внутренняя центробежная форсунка; 3 – коллектор наружной центробежной форсунки; 4 – тангенциальные каналы; 5 – струйные форсунки окислителя; 6 – камера сгорания; 7 – конус распыла наружной центробежной форсунки; 8 – конус распыла внутренней центробежной форсунки; 9 – струя; А – плѐнка на стенке КС, образованная в результате соударения струи с ней

При проектировании форсуночных головок КС ЖРД необходимо стремиться к повышению их эффективности, то есть увеличению пропускной способности, а также повышению стабильности процесса впрыска топлива в КС. На это большое влияние оказывает конфигурация проточной части струйной форсунки и её чистота (шерховатость).

Производительность струйной форсунки определяется следующим выражением:

$$G_{\phi} = \mu_{\phi} F_{\phi} \sqrt{2g\gamma\Delta p_{\phi}},$$

где G_{ϕ} – секундный расход жидкости; μ_{ϕ} – коэффициент расхода форсунки; F_{ϕ} – площадь проходного сечения форсунки; γ – удельный вес жидкости; Δp_{ϕ} – перепад давления на форсунке.

Коэффициент расхода μ_{ϕ} , равный отношению действительного расхода к теоретическому, всегда меньше единицы из-за сужения струи в сопле форсунки (рис. 1, а) и уменьшения действительной скорости истечения из-за гидравлических сопротивлений. Коэффициент расхода для струйной форсунки определяется экспериментальным путѐм.

Большое влияние на величину μ_{ϕ} оказывает отношение длины цилиндрической части сопла форсунки к его диаметру l_c/d_c , конфигурация проточной части струйной форсунки, чистота (шерховатость) проточной части, входная фаска и др.

В широко применяемых струйных форсунках, таких, как показано на рис.1, при $l_c/d_c = 0,5 \dots 1$ коэффициент расхода $\mu_{\phi} = 0,6 \dots 0,65$. При $l_c/d_c = 2 \dots 5$ коэффициент расхода $\mu_{\phi} = 0,75 \dots 0,85$ [1; 2], что показывает неэффективную пропускную способность этих струйных форсунок. Необходимо отметить, что с ростом l_c/d_c возрастает разброс

по величине μ_{ϕ} , а следовательно возрастает нестабильность по расходу жидкости через такие струйные форсунки.

В работе [5] приведены результаты исследования влияния входной фаски струйных форсунок на их коэффициент расхода и дальноточность применительно к жидкостным ракетным двигателям малой тяги (рис. 3) [5].

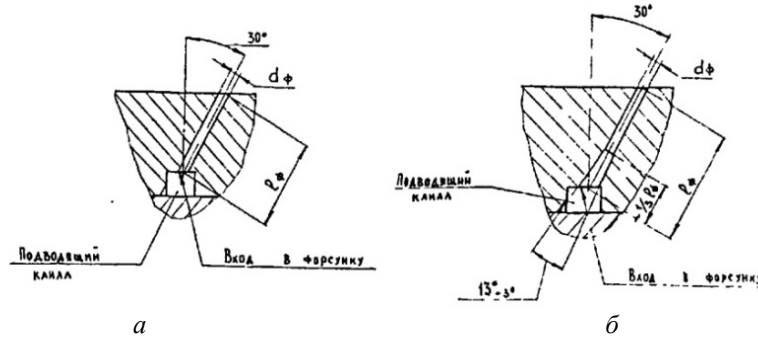


Рис. 3. Варианты форсунок с различными конфигурациями входа:
а – струйная форсунка выполненная методом электроискрового прожигания;
б – струйная форсунка, выполненная методом электроискрового прожигания с последующим выполнением конического входного участка

В книге «Ракетные двигатели» приведены результаты исследований американских учёных по определению коэффициента расхода струйных форсунок различной конфигурации (Таблица) [6]. Гладкие и хорошо закругленные входные кромки струйных форсунок и сверление с высокой чистотой поверхности этих отверстий обеспечивают довольно высокие значения μ_{ϕ} , но не более 0,9.

Таблица. Значения коэффициентов расхода для форсунок с сопловыми отверстиями различных типов

Тип отверстия	Диаметр, мм	Коэффициент расхода
С острой входной кромкой	>2,5 <2,5	0,61 ~ 0,65
Короткое цилиндрическое с закругленной гладкой кромкой $L/D > 3,0$	1 1,6 1 при $L/D \sim 1,0$	0,88 0,90 0,70
Короткое цилиндрическое с коническим входом	0,5 1 1,6 2,5 3,2	0,7 0,82 0,76 0,84–0,80 0,84–0,78
Короткое цилиндрическое с закрученным потоком	1 – 6,35	0,2 – 0,55
Коническое с острой выходной кромкой	1 1,6	0,70 – 0,69 0,72

Необходимо отметить, что приведённые выше конструктивные исполнения струйных форсунок не обеспечивают высокого значения коэффициента расхода μ_{ϕ} .

В середине 70-х годов был разработан отраслевой стандарт ОСТ-92-1633-76 Отверстия малых диаметров высокой точности [8]. По этому стандарту изготавливаются три высокоточные профилированные иглы (разного профиля) и путём трехступенчатого прокалывания (формирования) получают такие высокоточные форсунки, которые обеспечивают высокое значение коэффициента расхода $\mu_{\phi} = 0,95 \dots 0,97$, его стабильность в широком диапазоне перепадов давления на струйных форсунках, а также «дальнобойность» струи.

В настоящее время появилось высокоточное трёхмерное электроэрозионное оборудование, позволяющее с высокой точностью проводить изготовление прецизионных микроотверстий. Конструктивные особенности и внешний вид таких струйных форсунок после электроэрозионной обработки представлены на рис. 4. Такие высокоточные профилированные струйные форсунки обеспечивают значение коэффициента расхода $\mu_{\phi} = 0,97 \dots 0,98$, максимальную стабильность в широком диапазоне перепадов давления на струйной форсунке и обеспечивают стабильную «дальнобойность» струи. Применение таких струйных форсунок повышает стабильность параметров ЖРД (ЖРДМТ) и их теплового состояния.

На рис. 4 представлена конфигурация струйных форсунок (их конструктивные размеры и требуемая чистота поверхности проточной части), а также фотографии реального исполнения таких форсунок [7].

Профилированное отверстие форсунки представляет собой заходный конус с углом 30° , плавно сопряжённый с цилиндрической сопловой частью длиной $\sim 0,2$ мм. Выполнение столь малого профилированного отверстия ($d_c = 0,25 \dots 0,6$) с высокой точностью (порядка седьмого квалитета) трудновыполнимо механическими методами обработки.

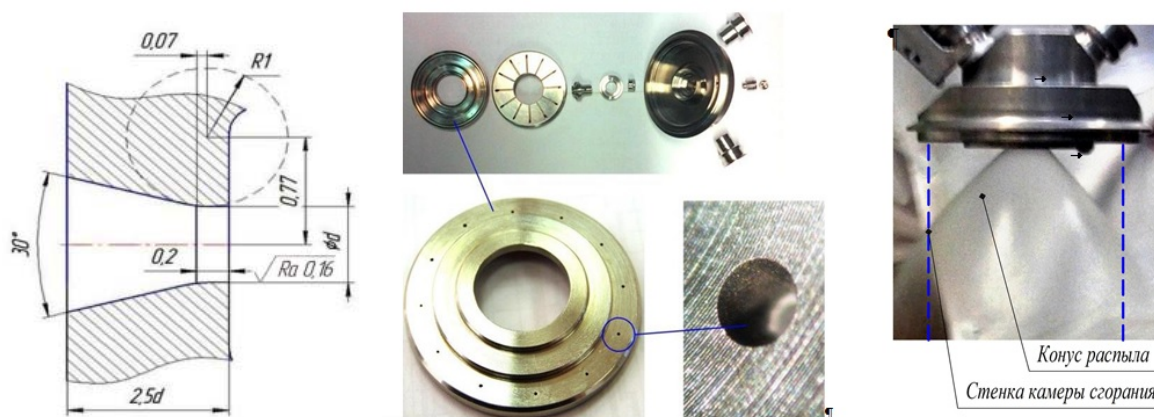
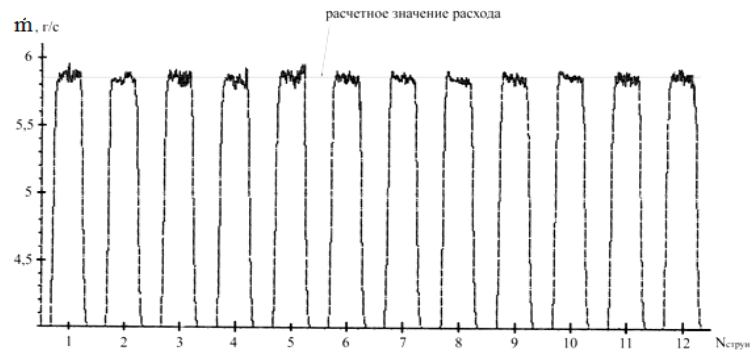


Рис. 4. Профилированное отверстие струйной форсунки, изготовленное методом трёхмерной электроэрозионной обработки



а



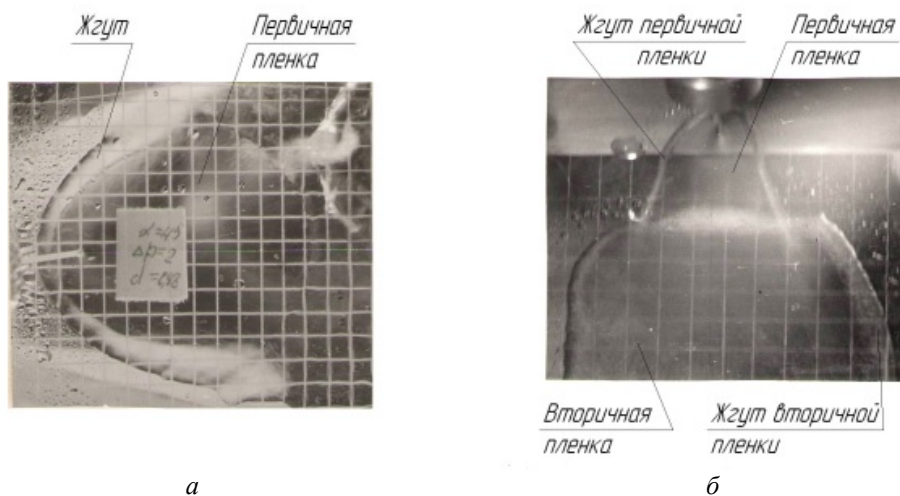
б

Рис. 5. Истечение струй при проливке струйных форсунок с демонстрацией «дальнобойности» (а) и стабильности (б)

На рис. 5, а представлены реальные проливы водой данных форсунок, демонстрирующие их дальнобойность и эффективность. На рис. 5, б продемонстрирована стабильность истечения при проливках форсуночной головки с 12 струйными форсунками. Необходимо отметить, что на стабильность параметров двигателя и его теплового состояния в значительной степени влияют стабильность параметров пленок компонентов топлива, участвующих в рабочем процессе в КС ЖРД (ЖРДМТ). На стабильность формирования плёнок компонентов топлива влияет стабильность и «дальнобойность» струй. В Самарском университете совместно с АО КБХИММАШ им. А.М. Исаева был проведён большой объём исследовательских работ по изучению влияния струй на стабильность формирования плёнок при попадании их на преграду (поверхность дефлектора или стенку КС).

На рис. 6 представлен процесс формирования первичной плёнки при столкновении струи с преградой и формирование вторичной плёнки на преграде (стенке КС) при натекании на неё первичной плёнки [9].

При разработке новых ЖРД и ЖРДМТ рекомендуется применять струйные форсунки с конструктивными параметрами, приведёнными на рис. 4. Они обеспечивают высокое значение коэффициента расхода $\mu_{\phi} = 0,96 \dots 0,98$ и повышение стабильности и дальнобойности истечения жидкости на выходе из струйной форсунки.



а

б

Рис. 6. Процесс формирования первичной и вторичной плёнки: а – растекание первичной плёнки на преграде; б – растекание вторичной плёнки на преграде

Библиографический список

1. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 488 с.
2. Основы теории и расчёта жидкостных ракетных двигателей. В 2 кн. Кн. 1 / под ред. В.М. Кудрявцева. М.: Высшая школа, 1993. 367 с.
3. Шевелюк М.И. Теоретические основы проектирования жидкостных ракетных двигателей: учеб. пособие для вузов. Москва: Оборонгиз, 1960. 684 с.
4. Казанкин Ф.А., Ларин Е.Г., Бешенев Ю.А., Кутуев Р.Х., Салич Л.В. Способ организации рабочего процесса в камере сгорания жидкостного ракетного двигателя малой тяги: патент РФ № 2319853; опублик. 20.03.2008; бюл. № 8.
5. Андреев Ю.З. Исследование зависимостей характеристик ЖРДМТ тягой 50...400 Н на топливе АТ+НДМГ от основных параметров двухкомпонентной соосной центробежной форсунки и струйных форсунок завесы. Дис. ... канд. техн. наук. Нижняя Салда, 2004. 181 с.
6. Саттон Д. Ракетные двигатели: основы теории и конструкция жидкостно-реактивных двигателей. М.: Изд-во иностранной литературы, 1952. 330 с.
7. Агеенко Ю.И., Пегин И.В., Шаламов Е.А., Ильин Р.В. Экспериментальное исследование возможности повышения эффективности жидкостного ракетного двигателя тягой 400 Н с дефлекторно-центробежной схемой смешения // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20, № 1. С. 71-78.
8. ОСТ 92-1633-76. Отверстия малых диаметров высокой точности. Типовые технологические процессы образования отверстий методом холодной штамповки. М.: Издательство стандартов, 1990. 28 с.
9. Агеенко Ю.И. Исследование параметров смесеобразования и методический подход к расчётам и проектированию ЖРДМТ со струйно-центробежной схемой смешения компонентов АТ и НДМГ на стенке камеры сгорания // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. 2009. № 3 (19), ч. 2. С. 171-177. DOI: 10.18287/2541-7533-2009-0-3-2(19)-171-177

INCREASING THE EFFICIENCY AND STABILITY OF FUEL SUPPLY TO THE COMBUSTION CHAMBER OF A LIQUID ROCKET ENGINE BY SPRAY NOZZLES

© 2024

- Yu. I. Ageenko** Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Engineering and Technology;
Technological University named after twice Hero of the Soviet Union
Pilot-Cosmonaut A.A. Leonov, Korolev, Russian Federation; yi.ageenko@mail.ru
- A. S. Bubnova** Student of the Department of Engineering and Technology;
Technological University named after twice Hero of the Soviet Union
Pilot-Cosmonaut A.A. Leonov, Korolev, Russian Federation;
annette.bubnova@mail.ru

In this paper, various configurations of jet nozzles are analyzed, as well as their design. The effects of the inlet chamfer of jet nozzles on their flow rate and range are considered. It is shown out that today it is expedient to make precision micro-holes of the nozzles using high-precision three-dimensional electric-erosion equipment. The optimal design parameters of jet nozzles are also determined.

Combustion chamber; nozzle; liquid propellant rocket engine; low thrust liquid propellant rocket engine

Citation: Ageenko Yu.I., Bubnova A.S. Increasing the efficiency and stability of fuel supply to the combustion chamber of a liquid rocket engine by spray nozzles. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024. V. 23, no. 2. P. 7-13. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-2-7-13

References

1. Dobrovolskiy M.V. *Zhidkostnye raketnye dvigateli. Osnovy proektirovaniya* [Liquid rocket engines]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ., 2005. 488 p.
2. *Osnovy teorii i rascheta zhidkostnykh raketnykh dvigateley. V 2 kn. Kn. 1* [Fundamentals of the theory and calculation of liquid rocket engines. In 2 books. Book 1 / ed. by V.M. Kudryavtsev]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1993. 367 p.
3. Shevelyuk M.I. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya zhidkostnykh raketnykh dvigateley: ucheb. posobie dlya vuzov* [Theoretical foundations for the design of liquid rocket engines: Study guide for universities]. Moscow: Oborongiz Publ., 1960. 684 p.
4. Kazankin F.A., Larin E.G., Beshenev Yu.A., Kutuev R.Kh., Salich L.V. *Sposob organizatsii rabocheho protsessa v kamere sgoraniya zhidkostnogo raketnogo dvigatelya maloy tyagi* [Method for organization of operating process in combustion chamber of low-thrust liquid-propellant rocket engine]. Patent RF, no. 2319853, 2008. (Publ. 20.03.2008, bull. no. 8)
5. Andreev Yu.Z. *Issledovanie zavisimostey kharakteristik ZhRDMT tyagoy 50...400 N na toplive AT+NDMG ot osnovnykh parametrov dvukhkomponentnoy soosnoy tsentrobezhnoy forsunki i struynykh forsunok zavesy. Dis. kand. tekhn. nauk* [Dependence of 50...400 N NTO+UDMH liquid rocket engine characteristics on the basic parameters of a bipropellant coaxial swirl injector and jet injectors of the cooling film. Cand. eng. sci. diss.]. Nyzhnyaya Salda, 2004. 181 p.
6. Sutton G. *Rocket propulsion elements: An introduction to the engineering of rockets*. New York: Wiley, 1949. 361 p.
7. Ageenko Y.I., Pegin I.V., Shalamov E.A., Ilyin R.V. Experimental study of the possibilities of increasing the effectiveness the liquid rocket engine thrusters 400 newtons with deflector centrifugal mixing scheme. *Aerospace MAI Journal*. 2013. V. 20, no. 1. P. 71-78. (In Russ.)
8. OST 92-1633-76. High-precision small diameter holes. Standard technological processes for the formation of holes by cold stamping. Moscow: Izdatel'stvo Standartov Publ., 1990. 28 p. (In Russ.)
9. Ageenko Y.I. Mixing parameters investigations and methods of approach to calculations and development of the thrusters with a spray-centrifugal scheme of NT and NDMH mixing on the confusion chamber wall in considered. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2009. No. 3 (19), part 2. P. 171-177. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2009-0-3-2(19)-171-177