

УДК 621.454.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЖРДМТ ТЯГОЙ 400 Н НА ЕГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

©2014 Ю.И. Агеенко, Р.В. Ильин, И.В. Пегин

«Конструкторское бюро химического машиностроения им. А.М. Исаева» –
филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», г. Королёв

Проведена расчётно-экспериментальная работа по выбору оптимальных конструктивных параметров центробежной форсунки горючего для получения высоких энергетических характеристик жидкостного ракетного двигателя малой тяги (ЖРДМТ) с дефлекторно-центробежной схемой смешения тягой 400 Н. В дефлекторно-центробежной схеме смесеобразования установлена одна центробежная форсунка, соосная с камерой сгорания. С увеличением тяги двигателя увеличивается и диаметр камеры сгорания, следовательно, увеличивается длина свободного пролёта плёнки горючего в конусе распыла центробежной форсунки до встречи с внутренней стенкой камеры сгорания. Таким образом, необходимо определить параметры центробежной форсунки, которые обеспечивают устойчивость плёнки горючего (отсутствие распада плёнки) на этом пролёте до встречи со стенкой камеры сгорания. Для эффективной организации процесса жидкофазного смешения компонентов топлива на внутренней стенке камеры сгорания, близкого к оптимальному, был выполнен расчёт конструктивных параметров центробежной форсунки (диаметр тангенциальных отверстий, длина и диаметр камеры закручивания, длина и диаметр сопла форсунки), которые обеспечивали бы устойчивость плёнки горючего на всём свободном пролёте до внутренней стенки камеры сгорания, а также скорость, толщину плёнки и угол конуса распыливания. При оптимальном выборе параметров, плёнки окислителя и горючего взаимно проникают друг в друга на полную их толщину. При этом происходит более полное преобразование компонентов топлива, что в итоге обеспечивает более высокие энергетические характеристики двигателя. В статье представлены результаты огневых испытаний ЖРДМТ тягой 400 Н с различными конструктивными параметрами центробежной форсунки дефлекторно-центробежной схемы смесеобразования. Из результатов испытаний следует, что при снижении номинального перепада давления на центробежной форсунке до определённого предела происходит увеличение значения удельного импульса. При значительном снижении входного давления и, как следствие, значительном снижении перепада давления на центробежной форсунке возрастает амплитуда колебаний давления в камере сгорания двигателя. Проведённый анализ результатов испытаний позволил выбрать оптимальные конструктивные параметры центробежной форсунки горючего для штатного ЖРДМТ тягой 400 Н.

Жидкостный ракетный двигатель малой тяги, дефлекторно-центробежная схема смешения, центробежная форсунка, факел распыла.

В «КБхиммаш им. А.М. Исаева» – филиале ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева» разработан ЖРДМТ тягой 400 Н по дефлекторно-центробежной схеме жидкофазного смешения [1, 2].

Смесеобразование самовоспламеняющихся компонентов: азотного тетраоксида (АТ) и несимметричного диметилгидразина (НДМГ) происходит на стенке камеры сгорания с образованием продуктов преобразования топлива.

При разработке двигателя тягой 400Н с дефлекторно-центробежной схемой смешения для получения высоких энергетических характеристик необходимо организовать процесс жидкофазного смешения, близкий к оптимальному. Одной из задач для реализации необходимого жидкофазного смешения является вы-

бор конструктивных параметров центробежной форсунки.

В дефлекторно – центробежной схеме установлена одна центробежная форсунка соосно с камерой сгорания. С увеличением тяги двигателя увеличивается и диаметр камеры сгорания. Следовательно, увеличивается длина свободного пролёта плёнки горючего в конусе распыла центробежной форсунки до встречи с внутренней стенкой камеры сгорания. Таким образом, необходимо рассчитать параметры центробежной форсунки, которые обеспечивают устойчивость плёнки горючего (отсутствие распада плёнки) на этом пролёте до встречи со стенкой камеры сгорания.

Известно, что в центробежной форсунке жидкость перед выходным отвер-

ствием сопла приобретает интенсивное вращение в камере закручивания, куда она поступает через тангенциальные каналы, и образует утончающуюся плёнку, представляющую собой полый конус [3, 4]. Распад плёнки конуса форсунки можно проследить по фотоснимкам, полученным при холодных проливках центробежной форсунки при разных давлениях на входе (рис. 1).

При очень малых давлениях подачи, т.е. малых скоростях истечения, выходящая жидкость образует неразорванную тонкую плёнку, которая вторично стягивается под влиянием сил поверхностного

натяжения (режим пузыря). С ростом давления подачи пузырь размыкается, и течение становится обычным конусом распыливания. По мере дальнейшего увеличения давления подачи длина плёнки уменьшается и место образования капель смещается к соплу форсунки до тех пор, пока плёнка не начинает распадаться вблизи сопла форсунки.

Распаду предшествует быстрое нарастание возмущений нераспавшейся плёнки. На её поверхности распространяются две группы волн, у которых по мере истечения интенсивно возрастает амплитуда (рис. 2) [4].

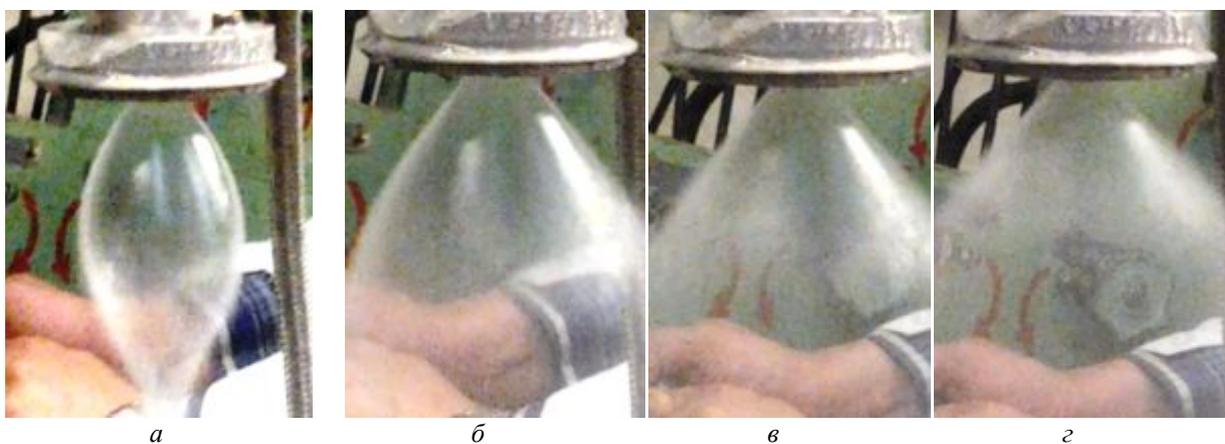


Рис.1. Проливка форсунки при разных перепадах давления: а - 0,05 МПа; б - 0,15 МПа; в - 0,25 МПа; з - 0,4 МПа

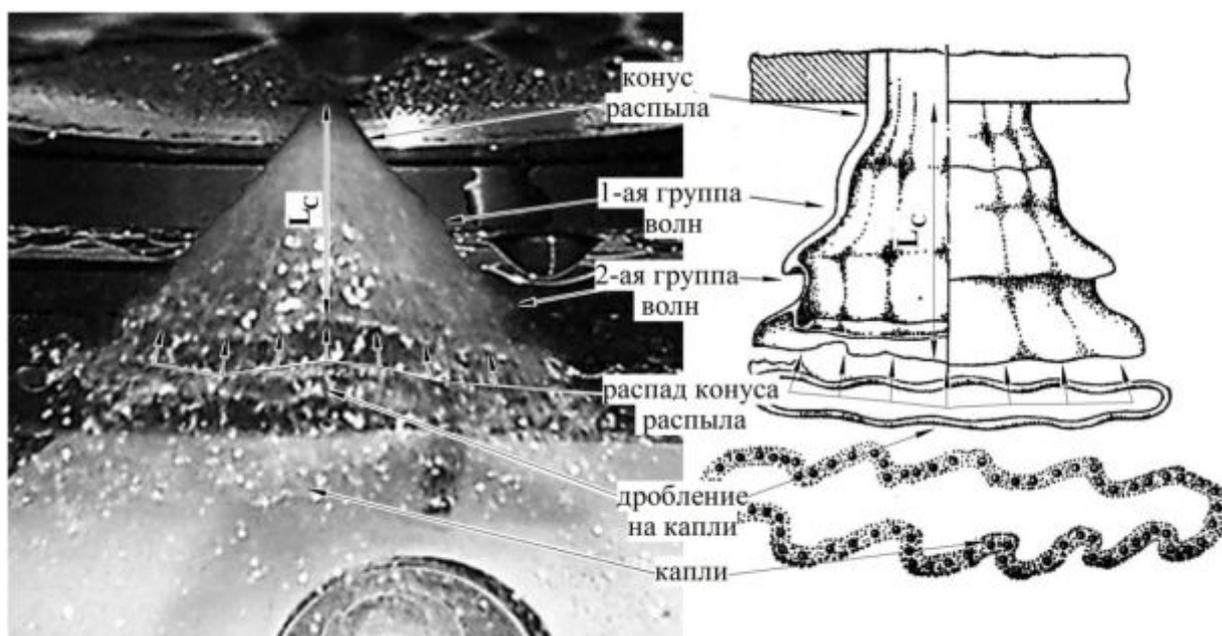


Рис.2. Факел распыливания центробежной форсунки

Гребни первой (идущей по движению) струи видны на контуре её границы. Они опоясывают поток, стремясь превратить плёнку в кольца, нанизанные на ось форсунки. Вторая группа идёт по окружности плёнки (перпендикулярно первой) и старается разделить жидкость на веер струй, расходящихся из центра сопла.

Длину нераспавшейся части плёнки центробежной форсунки L_c , т.е. расстояние от среза сопла форсунки до места разрушения плёнки можно определить по следующей критериальной зависимости [3]:

$$\frac{L_c}{r_c} = 251A^{-0,175}W_1^{-0,333}, \quad (1)$$

где r_c – радиус сопла;

A – геометрическая характеристика центробежной форсунки;

W_1 – критерий Вебера:

$$W_1 = \frac{\rho_1 V^2 r_c}{\sigma}, \quad (2)$$

где ρ_1 – плотность жидкости;

V – относительная скорость (характеризует перепад на форсунке);

σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Задавшись конкретными размерами форсунки, можно рассчитать длину нераспавшейся плёнки при различных значениях давления на входе в центробежную форсунку. На рис.3 представлен график расчётной длины нераспавшейся плёнки, полученной по формуле (1), в зависимости от давления на входе в центробежную форсунку ЖРДМТ тягой 400 Н.

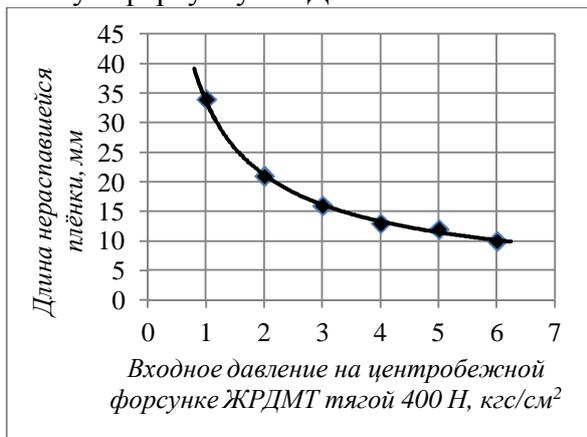


Рис.3. График зависимости расчётной длины нераспавшейся плёнки от давления на входе в центробежную форсунку ЖРДМТ тягой 400 Н

Для организации процесса жидкофазного смешения компонентов топлива на внутренней стенке камеры сгорания, близкого к оптимальному, необходимо рассчитать такие конструктивные параметры центробежной форсунки (диаметр тангенциальных отверстий, длина и диаметр камеры закручивания, длина и диаметр сопла форсунки), которые обеспечили бы устойчивость плёнки горючего на всём свободном пролёте до внутренней стенки камеры сгорания, а также скорость, толщину плёнки и угол конуса распыливания (необходимый вектор количества движения плёнки горючего и его направление). При этом необходимо учитывать, что эффективность жидкофазного смешения компонентов топлива в дефлекторно-центробежной схеме зависит от количества движения плёнок компонентов топлива и направления их движения. При оптимальном выборе параметров, плёнки окислителя и горючего взаимно проникают друг в друга на полную их толщину. При этом происходит более полное преобразование компонентов топлива, что в итоге обеспечивает более высокие энергетические характеристики двигателя.

На рис.4 приведён график зависимости удельного импульса ЖРДМТ тягой 400 Н от номинального перепада на центробежной форсунке горючего ΔP_H (перепада на центробежной форсунке при тяге двигателя $R=400$ Н) на разных режимах работы двигателей при дросселировании и форсировании до различных значений тяги. Результаты были получены при огневых испытаниях двигателей тягой 400 Н с центробежными форсунками горючего с разными ΔP_H . Были испытаны двигатели с номинальным перепадом на центробежной форсунке ΔP_H 0,2; 0,25; 0,3; 0,4 и 0,55 МПа при номинальном расходе горючего, соответствующем тяге 400 Н.

Каждая линия графика соответствует определённым условиям, при которых происходили испытания двигателей. Например, сплошная линия соответствует номинальному режиму работу ЖРДМТ.

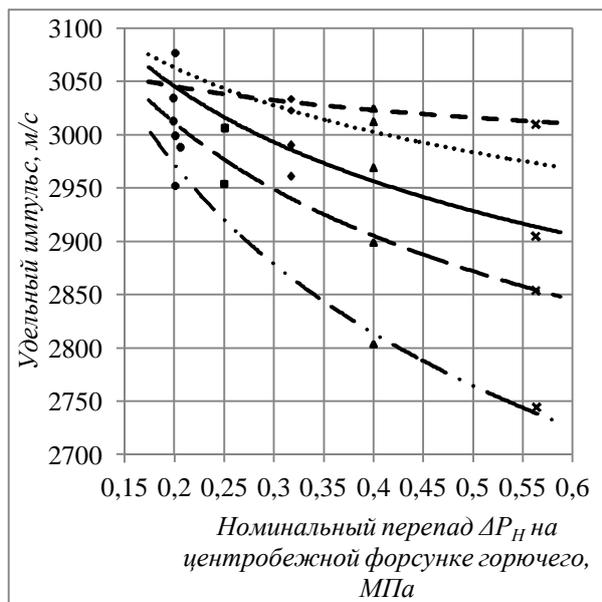


Рис.4. График зависимости удельного импульса от значения номинального перепада на центробежной форсунке горючего при дросселировании и форсировании двигателя до различных значений тяги (— — — $R=320$ Н; $R=360$ Н; ——— $R=400$ Н; — — — $R=420$ Н; — · · — $R=490$ Н) ● – ЖРДМТ с $\Delta P_H=0,2$ МПа; ■ – ЖРДМТ с $\Delta P_H=0,25$ МПа; ◆ – ЖРДМТ с $\Delta P_H=0,3$ МПа; ▲ – ЖРДМТ с $\Delta P_H=0,4$ МПа; × – ЖРДМТ с $\Delta P_H=0,55$ МПа)

На разных двигателях (с разными центробежными форсунками) на номинальном режиме (тяга 400 Н) были получены разные значения удельного импульса. И чем меньше значение перепада на форсунке, тем больше длина нераспавшейся плёнки факела центробежной форсунки и тем выше удельный импульс двигателя. Повышение удельного импульса наблюдается и при дросселировании (линии $R=320$ Н и $R=360$ Н), т.е. при снижении давления на входе в двигатель. И, соответственно, на входе в центробежную форсунку. Причём для двигателей с высоким номинальным перепадом на центробежной форсунке ΔP_H при дросселировании прирост удельного импульса выше. И наоборот, при форсировании (линии $R=420$ Н и $R=490$ Н), когда давление на входе в двигатель и, соответственно, перед центробежной форсункой возрастает, значение удельного импульса двигателя снижается. Это ещё раз свидетельствует о том, что при снижении перепада на центробежной форсунке увеличивается длина нераспавшейся

плёнки факела распыливания, что обеспечивает более эффективное жидкофазное смешение компонентов топлива на стенке камеры сгорания и, как следствие, более высокие энергетические характеристики двигателя.

Линия $R=320$ Н (рис.4), в отличие от остальных, практически горизонтальна. Это объясняется тем, что при работе всех испытанных двигателей на режиме глубокого дросселирования перепад на центробежной форсунке невелик, и поэтому распад плёнки до встречи со стенкой не наступает. Плёнка факела центробежной форсунки имеет вид, близкий к плёнке, изображённой на фото б) (рис.1). Независимо от номинального перепада на центробежной форсунке ΔP_H при глубоком дросселировании плёнка факела центробежной форсунки в любом случае, не распадаясь, долетит до стенки камеры сгорания.

На рис.4 видно, что при небольшом номинальном перепаде на центробежной форсунке ($\Delta P_H=0,25$ МПа и менее) удельный импульс на номинальном режиме (линия $R=400$ Н) и на режиме небольшого дросселирования (линия $R = 360$ Н) выше, чем удельный импульс при значительном дросселировании (линия $R=320$ Н). Это объясняется тем, что для эффективного процесса жидкофазного смешения компонентов топлива, как упоминалось выше, важно не только целостность и устойчивость плёнок, но и правильно рассчитанное количество движения плёнки и направление её движения. При значительном дросселировании скорость пролёта плёнки от центробежной форсунки уменьшается, а также уменьшается угол конуса распыливания. Особенно явно это проявляется при небольшом номинальном перепаде на центробежной форсунке. Поэтому процесс взаимного проникновения плёнок горючего и окислителя происходит менее эффективно, чем и обусловлено снижение значения удельного импульса по сравнению с номинальным режимом. Приведённые выводы подтверждаются и графиками, изображёнными на рис.5.

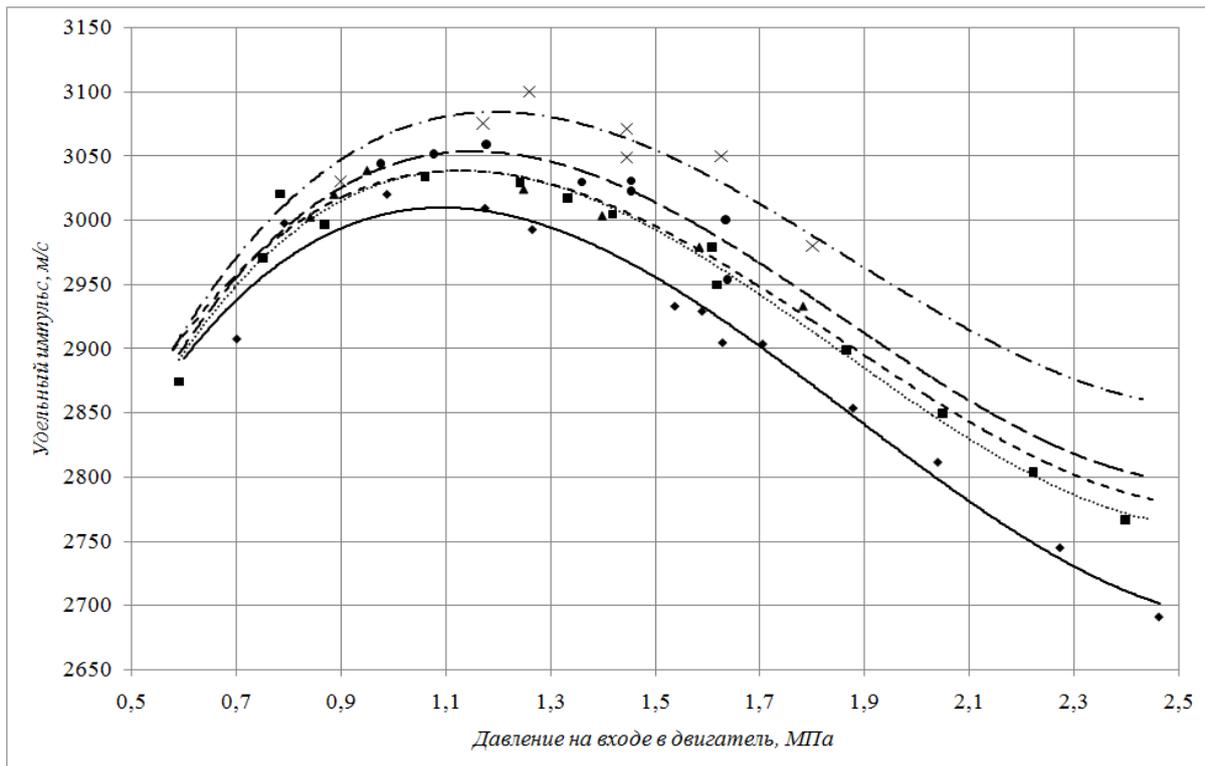


Рис.5. График зависимости удельного импульса от давления на входе в двигатель для ЖРДМТ с разными центробежными форсунками горючего
 (◆ — ЖРДМТ с $\Delta P_H=0,55$ МПа; ■ ЖРДМТ с $\Delta P_H=0,4$ МПа; ▲ - - - ЖРДМТ с $\Delta P_H=0,3$ МПа;
 ● — — — ЖРДМТ с $\Delta P_H=0,25$ МПа; × — — — ЖРДМТ с $\Delta P_H=0,2$ МПа)

На рис.5 приведены результаты огневых испытаний двигателей тягой 400 Н с центробежными форсунками горючего с разными ΔP_H в виде графиков зависимости удельного импульса от давления на входе в двигателя. Видно, что при дросселировании (давления на входе порядка 1,1...1,3 МПа) значение удельного импульса максимальное для всех двигателей. Но при этом в двигателях с меньшим номинальным перепадом на центробежной форсунке ΔP_H происходит смещение значения максимального удельного импульса вправо, т.е. ближе к номинальному режиму работы ЖРДМТ (давление на входе 1,47 МПа).

На рис.6 приведены графики изменения давления в камере сгорания в процессе испытания для двигателей тягой 400Н с центробежными форсунками горючего с разными ΔP_H . Из графиков следует, что на номинальном режиме двигатель с $\Delta P_H=0,25$ МПа работает с небольшими колебаниями давления в камере сгорания (амплитуда до 0,25 P_K). С увеличением номинального перепада ΔP_H на

центробежной форсунке амплитуда колебаний давления в камере сгорания уменьшается.

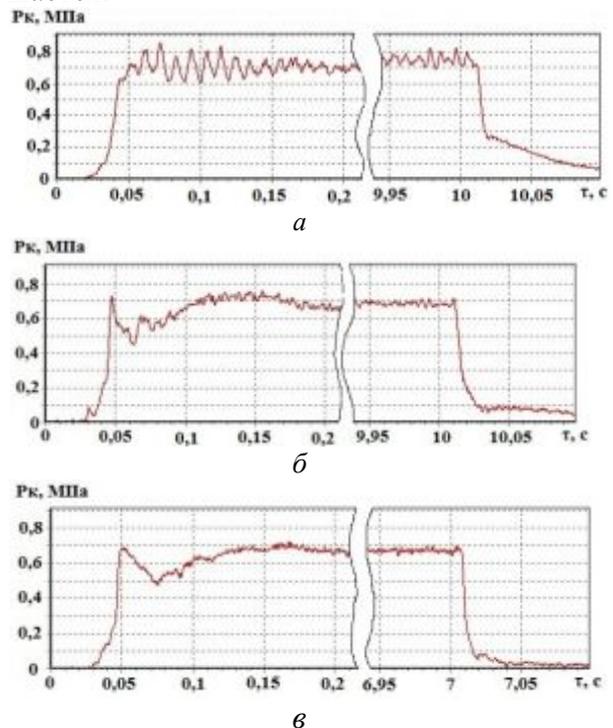


Рис.6. Графики изменения давления в камере сгорания при работе двигателя ЖРДМТ с $\Delta P_H=0,2$ МПа (а); 0,25 МПа (б); 0,55 МПа (в)

Причина этого – более устойчивая работа центробежной форсунки (с меньшей амплитудой и частотой плёнки факела) при высоком перепаде. Таким образом, при расчёте параметров центробежной форсунки необходимо учитывать этот факт и не выбирать перепад на центробежной форсунке ΔP_H менее 0,2 МПа. В противном случае это приведёт к менее устойчивой работе форсунки и, как следствие, менее устойчивой работе двигателя, а также к уменьшению скорости, толщины плёнки и угла факела распыла (вектора количества движения плёнки горючего и изменения его направления), что может привести к снижению эффективности жидкофазного смешения компонентов.

Выводы

1. При разработке ЖРДМТ тягой 400 Н по дефлекторно–центробежной схеме жидкофазного смешения для получения высоких энергетических характеристик

необходимо рассчитывать конструктивные параметры двигателя, близкие к оптимальным. Одними из таких конструктивных параметров являются параметры центробежной форсунки горючего.

2. Из результатов испытаний следует, что при снижении номинального перепада на центробежной форсунке ΔP_H до определённого предела происходит увеличение значения удельного импульса.

3. При значительном снижении входного давления и, как следствие, значительном снижении перепада на центробежной форсунке возрастает амплитуда колебаний давления в камере сгорания двигателя.

4. Проведённый анализ результатов испытаний позволил рассчитать конструктивные параметры центробежной форсунки горючего для штатного ЖРДМТ тягой 400 Н, близкие к оптимальным.

Библиографический список

1. Агеенко Ю.И. Ильин Р.В. Пегин И.В. Шаламов Е.А. Исследование возможности создания ЖРДМТ тягой 400 Н по дефлекторно–центробежной схеме смесеобразования компонентов топлива АТ и НДМГ // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 3(34), ч. 1. С. 71-76.

2. Агеенко Ю.И., Пегин И.В., Шаламов Е.А., Ильин Р.В. Экспериментальное ис-

следование 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.

3. Дитякин Ю.Ф. Распыливание жидкостей. М.: Машиностроение, 1977. 206 с.

4. Волынский М.С. Необыкновенная жизнь обыкновенной капли. М.: Знание, 1986. 144 с.

Информация об авторах

Агеенко Юрий Иванович, кандидат технических наук, главный конструктор, начальник отдела жидкостных ракетных двигателей малой тяги, «Конструкторское бюро химического машиностроения им. А.М.Исаева» - филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В.Хруничева». E-mail: kbhimmash@korolev-net.ru. Область научных интересов: организация рабочих процессов в жидкостных ракетных двигателях малой тяги, исследование параметров смесеобразования.

Ильин Руслан Владимирович, инженер-конструктор отдела жидкостных ракетных двигателей малой тяги, «Конструкторское бюро химического машиностроения им. А.М.Исаева» - филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В.Хруничева». E-mail: kbhimmash@korolev-net.ru. Область научных интересов: проектирование жидкостных ракетных двигателей малой тяги, исследование организации рабочих процессов.

Пегин Иван Вячеславович, заместитель начальника отдела жидкостных ракетных двигателей малой тяги, «Конструкторское бюро химического машиностроения им. А.М.Исаева» - филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В.Хруничева». Е-

mail: kbhimmash@korolev-net.ru. Область научных интересов: проектирование жидкостных ракетных двигателей малой тяги, исследование организации рабочих процессов.

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF DESIGN PARAMETERS OF A 400 N-THRUST LOW-THRUST LIQUID ROCKET ENGINE ON ITS ENERGY EFFICIENCY

© 2014 Y.I. Ageenko, R.V. Ilyin, I.V. Pegin

Isaev Chemical Machinery Design Bureau – Branch of Federal State Unitary Enterprise «Khrunichev State Research and Production Space Center», Korolev, Russian Federation

Computational and experimental work to select optimal design parameters of a fuel injector in order to obtain high-energy characteristics of low-thrust liquid rocket engines (LTLRE) with a deflector-centrifugal mixing scheme with 400 N thrust was carried out. A centrifugal atomizer is installed coaxially with the combustion chamber in the deflector-centrifugal mixing scheme. The engine thrust increases with the diameter of the combustion chamber and, consequently, the length of the free span of the fuel film in the cone of the fuel spray of the centrifugal injector also increases before hitting the inner wall of the combustion chamber. Thus, it is necessary to determine the parameters of the injector which provide the stability of the fuel film (absence of the film decay) along the span before it gets to the wall of the combustion chamber. For efficient organization of liquid-phase mixing of fuel components on the inner wall of the combustion chamber the design parameters of the centrifugal nozzle (the diameter of tangential holes, the length and diameter of the vortex chamber, the length and diameter of the injector nozzle) that would ensure the stability of the fuel film all along the free span up to the inner wall of the combustion chamber, as well as the speed, the film thickness and the angle of the atomization cone were calculated. In case of the optimal choice of parameters the films of oxidizer and fuel interpenetrate each other through their thickness. Thus, complete conversion of the fuel components takes place, which ultimately provides higher power characteristics of the engine.

The article presents the results of firing tests of a 400 N LTLRE with different design parameters of an injector with the deflector-centrifugal mixing scheme. It follows from the test results that as the nominal pressure drop across the centrifugal nozzle decreases to a certain limit the value of the specific impulse increases. If the inlet pressure is considerably reduced and, as a consequence, there is a significant reduction in the pressure drop across the centrifugal nozzle, the amplitude of the pressure oscillations in the engine's combustion chamber is increased. The analysis of the test results made it possible to optimize the design parameters of the fuel swirler for a regular 400N LTLRE.

Low-thrust liquid rocket engine (LTLRE), deflector-centrifugal mixing scheme, centrifugal nozzle, spray cones.

References

1. Ageenko Y.I., Ilyin R.V., Pegin I.V., Shalamov E.A. Investigation of the possibility of the creation of a 400 N thrust liquid rocket engine with a deflector-centrifugal mixing scheme of NT and NDMG mixing // Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2012. No. 3(34), part 1. P. 71-76. (In Russ.)
2. Ageenko Y.I., Pegin I.V., Shalamov E.A., Ilyin R.V. Experimental study of the possibilities of increasing the effectiveness of 400 N liquid rocket engine thrusters with a deflector-centrifugal mixing scheme // Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta. 2013. V. 20, no.1. P. 71-78. (In Russ.)
3. Dityakin Yu.F., Klyachko L.A., Novikov B.V., Yagodkin V.I. Raspylivanie zhidkostey [Liquid atomization]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1977. 206 p.

4. Volynskii M.S. Neobyknovennaya zhizn' obyknovennoy kapli [The extraordinary life of ordinary drops]. Moscow: Znanie Publ., 1986. 144 p.

About the authors

Ageenko Yuri Ivanovich, Candidate of Science (Engineering), Chief Designer, Head of the Department of Low-Thrust Liquid Rocket Engines, Renowned Designer. E-mail: kbhimmash@korolev-net.ru. Area of Research: organization of work processes in low-thrust liquid rocket engines, study of mixing parameters.

Ilyin Ruslan Vladimirovich, Design Engineer of the Department of Low-Thrust Liquid Rocket Engines. E-mail: kbhimmash@korolev-net.ru. Area of Re-

search: designing low-thrust liquid-propellant rocket engines, organization of work processes in low-thrust liquid-propellant engines.

Pegin Ivan Vyacheslavovich, Deputy Chief of the Department of Low-Thrust Liquid Rocket Engines. E-mail: kbhimmash@korolev-net.ru. Area of Research: designing low-thrust liquid-propellant rocket engines, organization of work processes in low-thrust liquid-propellant engines.