

## **ОЦЕНКА СОВЕРШЕНСТВА ПРОТЕКАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Сложность создания камеры сгорания (КС) для жидкостного ракетного двигателя малой тяги (ЖРД МТ) с совершенными техническими характеристиками (высоким удельным импульсом, малой массой и габаритами и др.) связана с исключительно напряженным рабочим процессом в камере, а также с необходимостью обеспечить сгорание топлива в крайне ограниченных объемах.

Процесс преобразования топлива в продукты сгорания (ПС) состоит из распыливания – дробления топлива на капли и первоначального распределения их в объеме КС; прогрева и испарения капель; смешения паров горючего и окислителя; химической реакции – собственно процесса горения. [1, 2]

Каждый из процессов протекает в соответствии с определенными законами, а скорость их протекания зависит от ряда физических факторов, таких как соотношение компонентов, давление, температура и скорость движения газов в камере сгорания.

Для быстрого и полного сгорания топлива необходимо создать его равномерное распределение как по соотношению компонентов топлива, так и по расходонапряженности и обеспечить такие гидродинамические условия в КС, чтобы поданные компоненты топлива как можно быстрее вступили в реакцию горения.

По характеру протекания и превращения процессов КС ЖРД принято разбивать по длине на следующие основные зоны: распыливания, испарения, смешения и сгорания.

Следует отметить, что деление камеры на указанные зоны несколько условно [3], так как процессы распыливания, испарения, смешения и сгорания не идут в строгой последовательности, и нельзя сказать, что только после полного распыливания начинается испарение, а после испарения – смешение и т.д. В каждой зоне одновременно протекает два или три процесса. Таким образом, название зоны определяет только наиболее характерный для нее процесс. Время образования ПС из жидких компонентов топлива определяется, в основном, временем нагрева и испарения капель топлива и временем смешения.

Для реализации процессов распыливания, испарения, смешения и собственно процесса сгорания топлива необходимо определенное время, зависящее от размеров КС. Причем для заданного процесса смешения, термодинамических и газодинамических параметров ПС и

рода топлива время пребывания должно обеспечить достаточно полное сгорание топлива, чтобы потери в удельном импульсе были минимальны. Для этого необходимо выбрать определенный объем КС.

Под объемом КС будем понимать ее объем вплоть до критического сечения сопла. Ввиду сложности рабочего процесса в камере вплоть до настоящего времени не создан теоретический метод расчета потребного объема КС и для определения его пользуются полуэмпирическими зависимостями. В настоящее время для определения объема КС ( $V_K$ ) используют такие характерные параметры, как время пребывания топлива в КС, приведенную длину КС ( $L_{пр}$ ), объемную теплонапряженность камеры и литровую тягу.

Время пребывания топлива в КС зависит от рода топлива, геометрических размеров камеры (приведенная длина или объем камеры) и требуемого совершенства рабочего процесса в камере. В вопросе определения объема КС большинство авторов ссылаются на ориентировочные значения приведенной длины, которая отличается для различного топлива. Для одного и того же топлива значение  $L_{пр}$  изменяется в широком диапазоне, так как экспериментальные значения  $L_{пр}$  были получены при разных значениях  $\rho_K$ , различной организации процесса смесеобразования и т.п.

Таким образом, в данном случае необходимо проведение серии испытаний двигателей с различной длиной КС и с изменением в каждом случае характеристической скорости. В результате этих измерений можно получить зависимости, по которым определяется оптимальная длина КС. Эти зависимости справедливы для данной топливной смеси и данной системы впрыска, при определенном соотношении компонентов топливной смеси. Поэтому необходимо проводить многочисленные испытания для того, чтобы решить вопрос о выборе формы КС, обеспечивающей ее оптимальные характеристики.

Приведенная длина (характеристическая длина) равна объему камеры сгорания, поделенному на площадь критического сечения сопла

$$L_{пр} = \frac{V_K}{F_{кр}}. \quad (1)$$

Это важный параметр, характеризующий геометрию КС ЖРД. По существу, характеристическая длина является мерой времени пребывания реагентов горючей смеси в камере сгорания.

В процессах сгорания в камерах ЖРД можно даже обнаружить движение продуктов сгорания вверх по потоку и обратную циркуляцию за зоной впрыска. Обычно интенсивность поперечного потока не бывает

достаточной для того, чтобы устранить продольное расслоение потока. Интенсивность обратной циркуляции изменяет эффективный объем камеры сгорания и, следовательно, характеристическую длину камеры, необходимую для полного сгорания. [4]

Определение связи параметров характеристической длины с объемом КС является актуальной задачей, которая до настоящего времени не решена в аналитическом виде. Кроме того, характеристическая длина влияет на устойчивость и стабильность процессов горения топливных компонентов.

Несмотря на то, что проблема устойчивости рабочего процесса в КС ЖРД постоянно находится в центре внимания теории и практики двиглестроения [5], в целом она еще не решена. Больше того, относительно механизма явления неустойчивости, причин появления вибраций и их нарастания до опасных пределов среди ученых нет единого мнения, различные школы трактуют эти вопросы по-разному.

Существование указанных вредных явлений и их важность для определения ресурса и режимных характеристик ракетного двигателя приводит к необходимости изучения сущности процессов, лежащих в основе этих явлений. Один из возможных путей решения этой задачи состоит в детальном описании процесса, чтобы, систематизировав экспериментальные данные, получить некоторые общие выводы.

Для оценки качества протекания процессов в ЖРД можно использовать либо коэффициенты полезного действия (энергетические коэффициенты), оценивающие совершенство преобразования исходной энергии в полезную работу, либо коэффициенты (импульсные коэффициенты), оценивающие потерю удельной тяги (импульса) вследствие некачественного протекания процессов преобразования энергии [1].

Энергетические коэффициенты (КПД) обозначаются  $\varphi$ , а импульсные коэффициенты –  $\eta$ . Любой импульсный коэффициент связан с соответствующим ему энергетическим коэффициентом соотношением

$$\varphi^2 = \eta. \quad (2)$$

В частности для КПД камеры можно записать

$$\varphi_K^2 = \eta_K. \quad (3)$$

Потери удельной тяги в общем случае определяются потерями в камере, в сопле и на тепловое сопротивление, которые необходимо оценивать соответственно коэффициентом потерь в камере ( $\varphi_K$ ), коэффициентом сопла ( $\varphi_C$ ) и коэффициентом потерь на тепловое сопротивление ( $\varphi_{\text{тепл}}$ ), так что

$$\Phi = \Phi_K \cdot \Phi_C \cdot \Phi_{\text{тепл}} \quad (4)$$

Потери в камере складываются из двух видов потерь: потерь на неполноту сгорания вследствие некачественного протекания процессов превращения топлива в ПС (эти потери не поддаются точному учету, обычно определяются экспериментально и характеризуются коэффициентом неполноты сгорания  $\Phi_{\text{сг}}$ ); потерь на неравномерность распределения по сечению камеры соотношения компонентов и расходонапряженности, выражаемых коэффициентом неравномерности  $\Phi_H$ . Таким образом, [1]

$$\Phi_K = \Phi_{\text{сг}} \cdot \Phi_H \quad (5)$$

При расчетах и анализе работы ЖРД приходится пользоваться различными коэффициентами. Для расчета удельной тяги пользуются коэффициентом камеры  $\Phi_K$ . В данном исследовании не учитываются коэффициенты всех потерь в камере.

Также коэффициентов камеры сгорания  $\Phi_K$  называют отношение действительной характеристической скорости в камере к идеальной, вычисленной при тех же значениях соотношения компонентов ( $k_m$ ) и давления в КС ( $p_K$ ):

$$\Phi_K = c_* / c_*^{u\partial} \quad (6)$$

где  $c_*$  - экспериментальная (действительная) характеристическая скорость в камере, а  $c_*^{u\partial}$  - теоретическая (идеальная) характеристическая скорость в камере. [7]

Наряду с характеристической скоростью для оценки совершенства процессов в КС применяют расходный комплекс

$$\beta = p_K \cdot F_{\text{кр}} / \dot{m} \quad (7)$$

Используется относительная величина

$$\Phi_\beta = \frac{\beta_\text{э}}{\beta_{\text{теор}}} \quad (8)$$

где  $\beta_\text{э}$  - экспериментальное значение комплекса  $\beta$ ;  $\beta_{\text{теор}}$  - теоретическое значение комплекса  $\beta$ . [6]

Отличие экспериментального значения комплекса  $\beta_\text{э}$ , полученного на основании опытных данных, от рассчитанного свидетельствует о недостаточном качестве организации и протекания процессов в КС, т.е. о потерях в КС. Таким образом [6]

$$\varphi_{\kappa} = \varphi_{\beta} = \beta_{\varepsilon} / \beta_{теор} . \quad (9)$$

Основным параметром, служащим для оценки работы ЖРД и определения его характеристик является удельный импульс давления в КС  $\beta$  (или комплекс  $\beta$  – расходный комплекс), который теоретически зависит только от рода топлива и является постоянной термодинамической характеристикой данного топлива. Для данного топлива величина комплекса  $\beta$  зависит только от качества протекания процессов в КС и не зависит от процессов в сопле. Таким образом, для данного топлива  $\beta$  является характеристикой, определяющей работу только КС.

Этот коэффициент характеризует качество процесса сгорания. Он используется при расчете форсунок и для оценки топлива, а также при изучении совершенства процесса сгорания. Использование  $\varphi_{\beta}$  удобно на практике для анализа стабильности характеристик в процессе серийного изготовления камер, при их доводке для сравнения совершенства различных вариантов смесительных головок.

### Выводы

Таким образом, проведя ряд экспериментов для ЖРД МТ с изменением длины КС и характеристической скорости, можно определить такие параметры КС, при которых коэффициент качества будет максимальный, что будет свидетельствовать об эффективности работы двигателя.

Дальнейшим этапом исследований будет проведен ряд экспериментов по изучению и наблюдению протекания процессов в КС ЖРД МТ.

### Список использованных источников

1. Добровольский, М.В. Жидкостные ракетные двигатели [Текст]: учеб. для вузов / М.В. Добровольский. - М.: Машиностроение, 1968. – 398 с.
2. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей [Текст]: учеб. для вузов / Васильев А. П., Кудрявцев В. М., Кузнецов В. А. и др.; под ред. В. М. Кудрявцева. - 3-е изд., испр. и доп. .– М: Высш. школа, 1983. -703 с.
3. Синярев, Г.Б. Жидкостные ракетные двигатели. Теория и проектирование [Текст] / Г.Б Синярев, М.В. Добровольский.- М.: Гос. изд-во оборонной промышленности, 1955. - 499 с.
4. Ракетные двигатели [Текст] / М. Баррер, А. Жомотт, Б. Ф. Вебек, Ж. Ванденкеркхове. - М.: государственное научно-техническое изда-

тельство ОБОРОНГИЗ, 1962.

5. Крокко, Л. Теория неустойчивости горения в жидкостных ракетных двигателях [Текст] / Л. Крокко, Чжен Синь-и.- М.: Изд-во иностранной литературы, 1958г. -351с.

6. Пунтус, С. А. Оценка совершенства процессов в камере сгорания [Текст] / С. А. Пунтус // XVIII міжнар. молод. наук.-практ. конф. «Людина і космос»: збірник тез., 6-8 квітня 2016р.- м. Дніпропетровськ, – Дніпропетровськ: НЦАОМ, 2016. – С. 129.

7. Алемасов, В.Е. Теория ракетных двигателей [Текст]: учеб. для вузов / В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегалин, А. П. Тишин; под ред. В. П. Глушко. — М.: Машиностроение, 1989. — 464 с.

*Поступила в редакцию 12.08.2016.*

*Рецензент: канд. техн. наук, доц. В.В. Спесивцев,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*