

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИЗМЕНЯЕМОЙ СТЕПЕНЬЮ РАСШИРЕНИЯ СОПЛА

Виктор Дмитриевич Горохов, зам. генерального конструктора ОАО "Конструкторское бюро химавтоматики",
доцент Воронежского государственного технического университета, к.т.н.

Владимир Викторович Черниченко, доцент Воронежского государственного технического университета, к.т.н.

Приведены результаты научно-исследовательских работ по созданию камеры жидкостного ракетного двигателя с центральным выдвижным телом, обеспечивающим изменение площади критического сечения сопла в процессе работы двигателя

Развитие современной ракетной техники предъявляет новые требования к жидкостным ракетным двигателям (ЖРД), связанные с дальнейшим повышением эффективности рабочего процесса, увеличением надежности и ресурса. Добиться указанных целей можно, проводя исследования и внедряя технические решения, направленные на оптимизацию конструкции камеры и двигателя в целом, а также применяя новые материалы и технологии.

Основным интегральным показателем экономической эффективности разработок в ракетно-космической технике являются стоимость вывода на орбиту одного килограмма полезного груза и возможность увеличения массы полезного выводимого груза. Одним из основных параметров, характеризующих степень совершенства ракетного двигателя, является удельный импульс тяги.

Установлено, что потери удельного импульса тяги на 0.1 % для кислородно-водородных двигателей РД0120 (Россия) и SSME (США) космических систем типа "Энергия-Буран" и Space Shuttle приводят к снижению полезной нагрузки на 200...250 кг.

Для достижения максимально возможной величины удельного импульса тяги чрезвычайно актуальным становится вопрос дальнейшего совершенствования внутрикамерных процессов.

Удельный импульс тяги может быть увеличен на 1...5 % при увеличении степени расширения сопла камеры сгорания (КС) путем уменьшения площади критического сечения при выдвижении профилированного охлаждаемого центрального

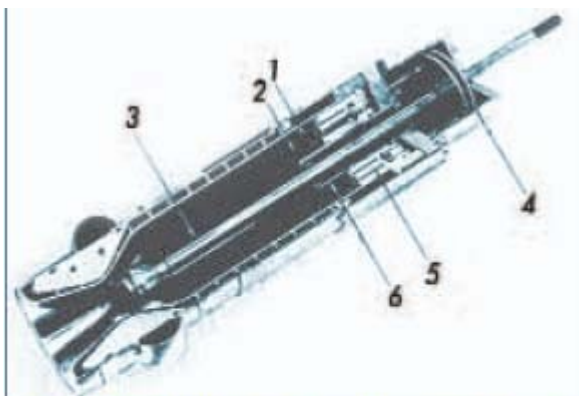


Рис. 1. КСЖРД с тягой, регулируемой путем изменения общей площади проходных сечений форсунок и площади критического сечения сопла: 1 - золотник; 2 - форсунка окислителя; 3 - игла; 4 - поршень привода дросселирующих органов; 5 - блок катализатора; 6 - форсунка горючего

тела, установленного по оси камеры, в критическое сечение при неизменной площади среза сопла.

Технические решения, связанные с созданием и размещением в камере подвижного центрального тела, регулирующего площадь критического сечения, открывают большие возможности при разработке двигателей с регулируемыми круглыми и кольцевыми соплами. Появляется возможность плавного регулирования тяги двигателя и степени расширения сопла по траектории полета, что существенно улучшает его энергетические характеристики, однако практическое использование такого способа в ракетном двигателестроении до настоящего времени сдерживается сложностью обеспечения работоспособности камеры с центральным выдвижным телом и отсутствием экспериментальных данных по эффективности его применения, в связи с чем дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования в данной области являются необходимыми и актуальными.

При создании перспективных ЖРД важнейшими задачами являются повышение энергетических характеристик и надежности, увеличение ресурса, обеспечение многозадачности, улучшение массовых характеристик. Эти задачи могут быть решены при проведении исследований по основным агрегатам ЖРД с учетом новейших достижений в области использования экологически чистых компонентов топлива, достижений в области схемных и конструкторско-технологических решений, использования перспективных материалов.

Ракетный двигатель с регулируемой тягой представляет достаточно большой интерес с многих точек зрения. Диапазон использования регулируемых ракетных двигателей с изменяемой тягой начинается от воздушных и земных ракетных снарядов и заканчивается ракетами-носителями и аппаратами для исследования других космических тел.

Возможные методы регулирования тяги двигателей могут быть разделены на следующие основные категории:

- ступенчатое изменение тяги. Для получения различных значений тяги в работу включаются несколько двигателей;
- дросселирование подачи топлива. Изменение расхода топлива достигается посредством дросселирующих клапанов или регулированием числа оборотов крыльчаток насосов;
- дросселирование двигателя изменением общей площади проходных сечений форсунок;
- дросселирование двигателя изменением площади критического сечения сопла и др.

Необходимо отметить, что, при глубоком дросселировании резко падает экономичность и ухудшаются условия охлаждения стенок камеры сгорания. Устойчивость, экономичность и охлаждение двигателя взаимосвязаны. Поэтому решение проблемы создания надежно

работающего ЖРД неотделимо от успешного решения каждой из этих задач.

Принципиальной особенностью двигателя с переменным критическим сечением сопел, отличающей его от существующих, является повышение удельного импульса тяги при дросселировании.

Анализ этих особенностей показывает, что регулировать тягу однокамерного ЖРД можно двумя путями: изменением расхода топлива и скорости истечения W_a .

В свою очередь, расход можно регулировать изменением геометрических размеров камеры сгорания ($F_{кр}$, F_a) и геометрии форсунок.

Необходимо отметить, что способы регулирования тяги путем изменения геометрических размеров форсунок достаточно подробно исследованы.

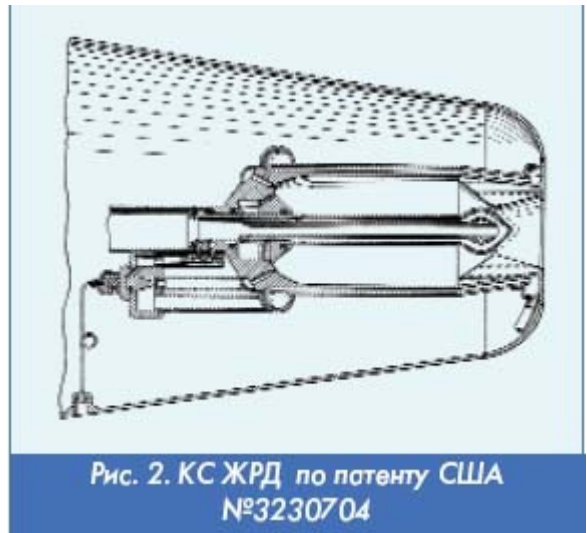
Можно регулировать тягу изменением площади критического сечения сопла $F_{кр}$ (при $F_a = const$). При уменьшении площади критического сечения сопла увеличиваются P_k , другие параметры, а также температура в камере сгорания T_k , термический к.п.д. η_t и степень расширения сопла.

Изменять $F_{кр}$ можно двумя способами: механическим и газодинамическим. Механический способ в основном состоит в применении профилированных "игл" - центральных тел, вводимых по специальным направляющим в критическое сечение сопла. Газодинамический способ основывается на уменьшении $F_{кр}$ путем вдувания газа, подаваемого через отверстия или щели в район критического сечения сопла.

Для сохранения в процессе регулирования тяги высокой экономичности при условии $P_k = const$

следует изменять расход топлива пропорционально изменению площади проходного сечения сопла форсунки $F_{ф}$ и $F_{кр}$. А для сохранения расчетного режима работы сопла на определенной высоте полета необходимо также, чтобы степень расширения сопла F_a оставалась постоянной. Для этого следует изменять F_a прямо пропорционально изменению $F_{кр}$.

Таким образом, для регулирования тяги при постоянном удельном импульсе I_u необходимо регулировать площади проходного сечения $F_{ф}$, $F_{кр}$, F_a пропорционально изменению.



В литературе представлена модельная двухрежимная камера ЖРД, в которой регулирующий орган выполнен в виде профилированного центрального тела с утолщением на конце. Смесительная головка данной камеры изготовлена из двух частей: неподвижной и подвижной, соосно перемещающихся друг относительно друга, при этом оси однокомпонентных форсунок окислителя и горючего расположены перпендикулярно к оси камеры сгорания. Регулирующий орган соединен с подвижной частью смесительной головки, связанной с исполнительным механизмом.

Перемещение иглы в район критического сечения сопла осуществляется вместе с подвижной частью смесительной головки, что позволяет одновременно с уменьшением критического сечения уменьшить площадь проходного сечения форсунок и, в то же время, приводит к уменьшению объема камеры сгорания и сокращению времени пребывания компонентов топлива. Одновременное изменение проходного сечения форсунок и площади критического сечения сопла позволяют поддерживать постоянным давление в камере при регулировании тяги. Использование смесительной головки, состоящей из подвижной и неподвижной частей, требует применения на исполнительном механизме (в данном случае - гидроцилиндре) значительных усилий и не позволяет достичь высокого давления в камере из-за негерметичности уплотнений между стенкой камеры сгорания и подвижной частью смесительной головки.

Выдан патент на камеру с регулируемой площадью критического сечения, в которой смесительная головка установлена неподвижно в камере сгорания, а регулирование площади осуществляется путем перемещения регулирующего органа, связанного с исполнительным механизмом, в критическое сечение.

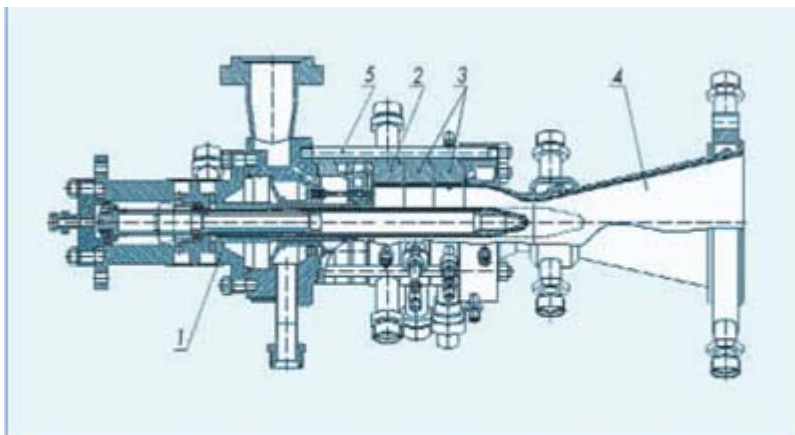


Рис. 3. Модельная кислородно-водородная камера с центральным выдающим телом: 1 - смесительная головка с центральным выдающим телом; 2 - вставка запальная; 3 - вставки; 4 - сопло; 5 - шпильки

В исходном положении регулирующий орган установлен таким образом, что его профилированная выходная часть входит в критическое сечение камеры и перекрывает его, при этом часть регулирующего органа расположена за критическим сечением. Площадь образованного кольцевого критического сечения в этом случае равна разности площадей

круглого критического сечения и площади регулирующего органа.

Такое расположение регулирующего органа обуславливает перемещение плоскости критического сечения в закритическую часть сопла, что приводит к нерасчетному истечению продуктов сгорания и, соответственно, значительным потерям экономичности на

первом режиме.

Размещение выходной части регулирующего органа в наиболее теплонпряженном месте требует более интенсивного охлаждения выходной части, что также ведет к потерям удельного импульса тяги.

При регулировании площади критического сечения регулирующей орган смещается в сторону закритической части и уменьшает площадь критического сечения. Плоскость критического сечения при этом смещается еще дальше в закритическую часть, что приводит к дальнейшим потерям экономичности из-за нерасчетного режима истечения. При таком конструктивном исполнении камеры с регулируемой площадью критического сечения в ряде случаев эффект от регулирования может быть не достигнут из-за изначальных потерь экономичности на первом режиме и значительного усложнения конструкции.

Комбинация изменения площади проходного сечения сопл форсунок $F_{\text{ф}}$ с изменением площади критического сечения сопла камеры сгорания $F_{\text{кр}}$ нашла применение в разработке одного из вариантов двигательной установки посадочной ступени космического аппарата "Викинг".

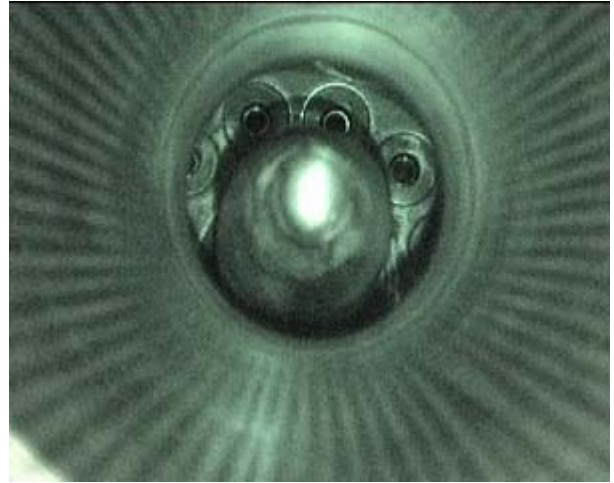
Необходимо отметить, что механическим путем изменять площадь критического сечения сопла камеры сгорания в процессе работы двигателя можно не только при помощи подвижного центрального тела. В литературе представлена конструктивная схема двухпозиционного сопла с регулируемой площадью критического сечения по патенту США № 3907222. В районе критического сечения сопла установлен специальный профилированный элемент, имеющий форму усеченного конуса со сферическими основаниями. Элемент изготовлен из композиционного материала типа окиси кремния и фенольной смолы; он может поворачиваться на оси с помощью привода. Ось установлена в дозвуковой части сопла. Если элемент расположен основанием конуса к камере сгорания, то обеспечивается минимальная площадь критического сечения. При повороте элемента вокруг оси вращения на 180° площадь критического сечения увеличивается и достигает максимального значения. Если элемент принимает положение под углом к оси, то происходит отклонение вектора тяги. Проведены стендовые испытания ракетного двигателя малой тяги данной конструкции.

Успешно проведенные в ОАО КБХА (Воронеж) огневые испытания модельной кислородно-водородной камеры с охлаждаемым центральным выдвижным телом, при которых впервые в мировой и отечественной практике была изменена площадь критического сечения во время работы камеры, подтвердили возможность создания ЖРД с регулируемым критическим сечением.

На первом огневом испытании модельной камеры продолжительностью 35 с центральное тело не выдвигалось. Во время испытания проверялась общая работоспособность камеры и

режимы охлаждения центрального тела. После испытаний проведена дефектация материальной части. Состояние материальной части не изменилось.

На втором огневом испытании модельной камеры продолжительностью 25 с центральное тело по команде управления на 11 с было выдвинуто в критическое сечение сопла. Время выдвижения центрального тела в сопло составило 0,1...0,12 с. При перемещении во время огневого испытания центрального тела в направлении сверхзвукового сопла (выдвинутое положение) и уменьшении площади критического сечения вдвое давление в камере сгорания возросло в 1,975 раза, как и ожидалось, и дальнейшие испытания проводились при повышенном давлении в камере сгорания. Расходы компонентов топлива при выдвижении центрального тела и уменьшении площади критического сечения изменились незначительно.

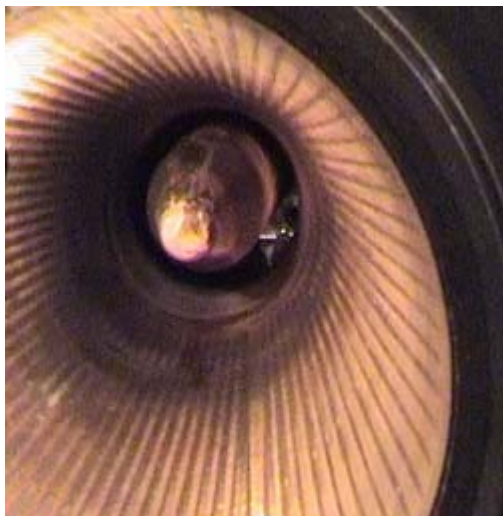


После испытаний произведен осмотр модельной камеры и выполнена дефектация состояния материальной части. Состояние материальной части оказалось удовлетворительным.

При определении характеристик экономичности камеры на одном режиме первого испытания и на двух режимах второго испытания использовались параметры, измеренные при работе модельной камеры.

Представленные данные показывают, что при испытаниях камеры были обеспечены режимы, для которых характерны пониженное соотношение компонентов топлива K_m . Расчетная величина давления в выходном сечении сопла является ниже критического значения на всех режимах $p_a < p_{кр}$. В результате этого течение газа в сопле происходило

при наличии скачка уплотнения и отрыва потока от стенки сопла.



Учитывая, что охлаждение камеры и центрального тела водой уменьшает температуру продуктов сгорания компонентов топлива и, соответственно, параметры экономичности, было сделано приведение удельного импульса тяги в пустоте $I_{уп}$ к адиабатным условиям. Кроме того, было сделано приведение этих параметров по соотношению компонентов топлива к номинальному значению $K_m = 4$.

В результате этих операций было определено приведенное значение удельного импульса тяги в пустоте. Полученные экспериментальные данные позволили выполнить расчет параметров кислородно-водородного ЖРД РД0120 с центральным выдвижным телом.

Таким образом, проведенный анализ имеющейся научно-технической и патентной литературы показал, что до настоящего времени нет созданного и эксплуатируемого ЖРД с центральным телом, а основной проблемой в создании камеры с регулируемой площадью критического сечения является разработка надежной конструкции подвижного центрального тела. Также недостаточно полно исследованы и определены такие параметры камеры ЖРД с регулируемым критическим сечением, как оптимальное месторасположение выходной части центрального тела, и, соответственно, длина центрального тела, его прочность и устойчивость, охлаждение камеры и центрального тела, утечки компонента, применяемого для охлаждения центрального тела, через уплотнительные элементы и др.

Несмотря на вышеперечисленные проблемы, необходимо отметить, что технические решения по созданию и размещению подвижного центрального тела в камере, регулирующей площадь критического сечения, открывают большие возможности по разработке двигателей с регулируемым круглым и кольцевыми соплами. Появляется возможность плавного регулирования тяги двигателя и степени расширения сопла по траектории полета, что существенно улучшает их энергетические характеристики.

Однако практическое использование такого способа в ракетном двигателестроении до настоящего времени сдерживается сложностью обеспечения работоспособности центрального выдвижного тела и отсутствием экспериментальных данных по эффективности его применения.