

координатной информации и позволили перейти к использованию в геопродуктах географических координат взамен картографических, что позволяет геометрически корректно целиком представить Землю в форме цифрового глобуса.

Список использованных источников

1. Лебедев В. В. Проектирование систем космического мониторинга / В.В. Лебедев, И.Н. Гансвинд ; Науч. Геоинформ. центр РАН // М.: Наука, 2010. – 388 с.
2. Афанасьев И. Инфракрасный “Канопус” и 72 попутчика / И.Афанасьев // Новости космонавтики. – 2017. – Т.27. – № 9 – С.40 – 47.
3. Афанасьев И. Один большой и три маленьких. Индия выполнила рекордный по числу полезных нагрузок запуск. / И. Афанасьев, А. Кучейко // Новости космонавтики. – 2017. – Т. 27 – № 4 – С. 30 – 36
4. Хромов А. Спутники ДЗЗ Sky Sat / А. Хромов // [электронный ресурс] /http:// www. Dauria.ru blog/ Sky Sat

УДК 641.45.035.5

СОПЛА РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И КРАТКИЙ ОБЗОР НА БУДУЩИЕ МОДИФИКАЦИИ СОПЛА ЛАВАЛЯ

Дюсембаева Диана Ивановна

Ddyu17@gmail.com

Студент третьего курса кафедры Космическая техника и технологии,

ЕНУ им. Л. Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан.

Научный руководитель – Жуманбаева А.С.

Сопло – это составная часть камеры ракетного двигателя, где происходит преобразование энергии продуктов сгорания в кинетическую энергию вытекающей из сопла струи газов. Скорость истечения рабочего тела из сопла определяет важнейшую характеристику ракетного двигателя – удельный или пульс тяги. [1]

На сегодняшний день, применяемые в космической технике сверхзвуковые сопла по устройству подразделяются на два основных типа:

- круглые сверхзвуковые сопла или сопла Лавалья.
- сопла с центральным телом.

В свою очередь сопла Лавалья по форме, расширяющейся (сверхзвуковой) части разделяются:

- на конические,
- профилированные.

Профилированные сопла по сравнению с коническими при одинаковой геометрической степени расширения имеют меньшую длину, массу и потери энергии. Именно профилированные сопла получили наибольшее распространение в ракетных двигателях.

Сопла с центральным телом по особенностям течения РТ в сверхкритической части подразделяются:

- на кольцевые – это осесимметричные сопла, в которых все сечения, нормальные оси симметрии потока, представляют собой кольца, имеют внешние и внутренние участки контура (рис. 1). Струя рабочего тела получается узкой, а поперечное сечение круглое при том, что само сопло обладает не большой длиной;
- штыревые – у контура расширяющейся части которых почти или полностью отсутствует внешний участок сопла, изображен на рисунке 2;
- тарельчатые, у контура расширяющейся части которых почти или полностью отсутствуют внутренний участок сопла.

- косое сопло - для получения сверхзвуковых скоростей истечения при постоянном профиле и широком диапазоне рабочих скоростей, в основном применяется в турбореактивных двигателях, представлено на рисунке 3.

Схемы сопел с центральным телом в отличие от круглых сверхзвуковых сопел очень многочисленны и многие из них нашли применение в других отраслях техники.

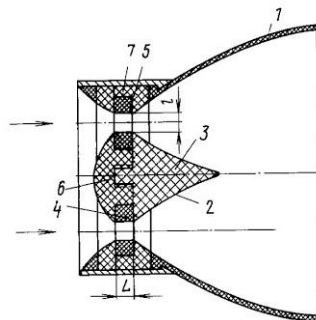


Рисунок 1. Кольцевое сопло

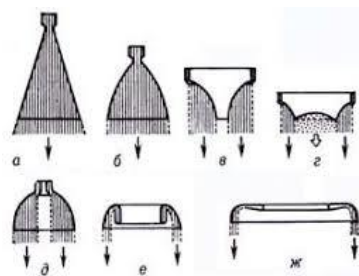


Рисунок 2. Типы сопел: а- коническое сопло Лавая, б- профилированное сопло Лавая, в- штыревое, г- штыревое аэродинамическое, д- тарельчатое, е- тарельчатое с обратным потоком, ж- тарельчатое с горизонтальным потоком.

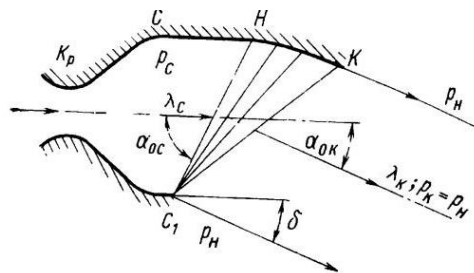


Рисунок 3. Сопло с косым срезом

При проектировании камеры РД необходимо стремиться к тому, чтобы сопло обеспечило максимальную скорость истечения РТ при минимальных потерях энергии и при минимальных габаритах и массе сопла. Сопло с максимальной степенью расширения и минимальной длиной считается идеальным, также сопло, которое может изменять длину, подстраиваясь под длину потока рабочего тела, то есть регулируемое сопло, было бы полезным, но конструктивно создать такое сопло сложно. [1]

Значительным недостатком реактивного сопла двигателей начальных ступеней является потеря тяги из-за работы в разреженной атмосфере. Так как двигатели рассчитывают на работу в более плотной атмосфере потери тяги составляют 7...9%, газовому потоку не хватает стенки сопла, а в плотных слоях атмосферы между потоком рабочего тела и стенкой сопла образуется зазор. В этом зазоре изменяется давление и образуются вихревые потоки, которые негативно сказываются на тяге двигателя. Это показано на рисунке 4.

Для решения проблемы потери тяги в ракетных двигателях предлагаю рассмотреть два способа модификации сверхкритической части сопла. Первый способ улучшения тяговых характеристик — это изменение длины с применением насадка. Второй вариант — установление дополнительного элемента в сверхкритическую часть. Ниже рассмотрены некоторые из многочисленных вариантов.

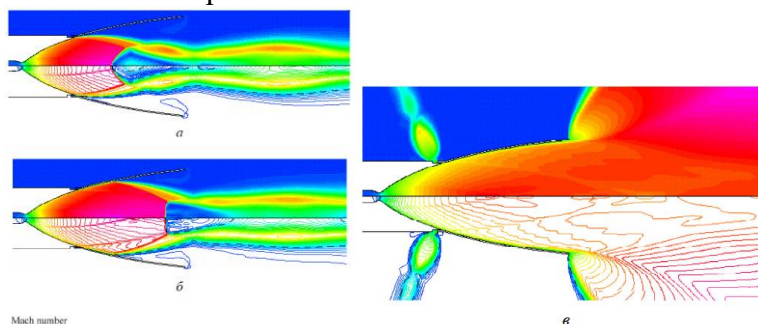


Рисунок 4. Поле чисел Маха для различных значений атмосферного давления: а) $p_a = 1$; б) $p_a = 0,4$; в) $p_a = 0,04$.

Двухконтурное щелевое сопло - это высотное сопло с изломом у контура, которое обладает свойством высотной компенсации (рис. 5).

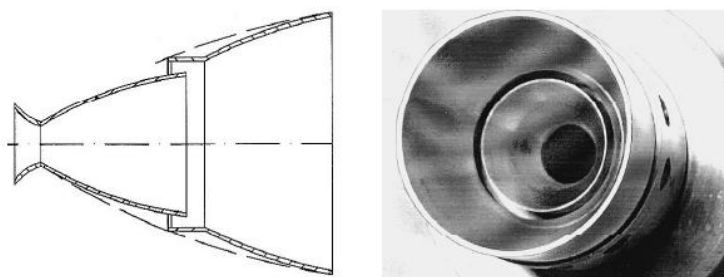


Рисунок 5. Двухконтурное щелевое сопло

Принцип работы заключается в следующем: при старте и полете аппарата в плотных слоях земной атмосферы из-за наличия контурного излома происходит принудительный отрыв потока газа. При этом скачки уплотнения располагаются на срезе земного сопла и препятствуют пере расширению потока газа в высотной насадке. Благодаря задержке скачков уплотнения на срезе земного сопла и возникновению отрыва пограничного слоя от стенки земное сопло работает в режиме близком к расчетному. При этом высотный насадок как бы отключается, не участвует в создании тяги и практически не имеет потерь тяги, связанных с перерасширением газа в нем.

При полете ракеты-носителя на высоте (в условиях разреженной атмосферы) скачки уплотнения (отрыв потока газа) со среза земного сопла перемещаются на выходное сечение высотного насадка, и он включается в работу, создавая дополнительную тягу. [4]

Огромный плюс двухконтурного щелевого сопла в том, что, благодаря наличию в сопле кольцевой щели степень расширения второго контура увеличивается и газ не перерасширяется внутри сопла. Также второй контур вступает в работу в нужный момент, то есть когда космический аппарат поднимается на нужную высоту. Минусы сложность создания кольцевой щели и незначительное увеличения веса сопла.

Также известный ракетный двигатель часто устанавливают на разные ракеты-носители, в свою очередь они имеют отсеки для двигателя с большими габаритами в отличие от габаритов ракеты-носителя для которого рассчитывался двигатель. Поэтому конструкторским решением было увеличение сверхкритической части сопла и тем самым

увеличение импульса тяги двигателя, путем прикрепления соплового насадка. Так как жидкостный ракетный двигатель (часто применяемый в космической отрасли) использует для теплозащиты проточное охлаждение суть которого снятие излишнего тепла путем прогонки одного компонента топлива (в основном горючего) между наружным и внутренним слоем стенки сопла (у сопла имеется внутренняя полость), насадок крепят с помощью силового кольца к охлаждаемой части. Сопловой насадок позволяет увеличить степень расширения сопла и его длину, тем самым получить больший удельный импульс. А для уменьшения веса в разработке [6] предложено использовать композитный материал, так как композитные материалы более легкие чем привычные нам металлы, но обладают той же прочностью, что помогает снизить сухую массу ракеты.

Возможны следующие варианты изготовления сопловых насадков и закрепления их на охлаждаемой части сопла: первый вариант - сопловой насадок изготавливается из легкого углерод-углеродного или углерод-керамического композиционного материала, который не сваривается с металлическим сплавом охлаждаемой части сопла ракетного двигателя. Силовое кольцо при этом конструктивно требуется, изображен на рисунке 6; второй вариант - сопловой насадок изготавливается из жаропрочного многослойного композиционного материала на основе металлических сплавов, который допускает сварное соединение с металлическим сплавом охлаждаемой части сопла ракетного двигателя. Силовое кольцо при этом конструктивно не требуется, представлен на рисунке 7; третий вариант - сопловой насадок изготавливается из более дешевого по отношению к предыдущему варианту жаропрочного металлического сплава, который не сваривается с металлическим сплавом охлаждаемой части сопла. Силовое кольцо при этом конструктивно не требуется, показан на рисунке 8.

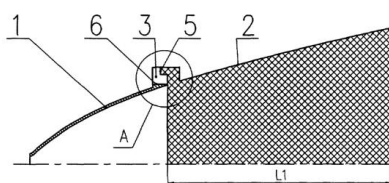


Рисунок 6. Насадок из легкого углерод-углеродного или углерод-керамического композиционного материала

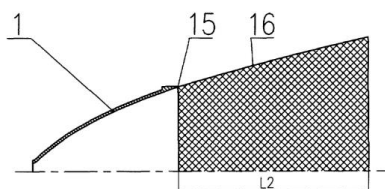


Рисунок 7. Насадок из жаропрочного многослойного композиционного материала

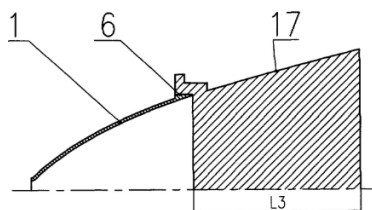


Рисунок 8. Насадок из дешевого жаропрочного металлического сплава

На рисунках показаны общие виды прототипов сверхкритической части сопла ракетного двигателя, где: 1 - охлаждаемая часть сопла ракетного двигателя; 2, 15, 16 - сопловой насадок из композиционного материала; 3 - силовое кольцо; 4 - сварное соединение силового кольца с охлаждаемой частью сопла; 5 - фланцевое соединение соплового насадка

из углерод-углеродного композиционного материала с силовым кольцом; б - разъемное соединение силового кольца с охлаждаемой частью сопла ракетного двигателя; 15 - сварное соединение охлаждаемой части сопла.

У каждого из вышеперечисленных вариантов есть свои качества, а именно:

При одинаковой массе сопловых насадков длины будут иметь значения $L_1 > L_2 > L_3$, что говорит о различной плотности композитного материала. При этом сопловой насадок в первом варианте имеет более низкие стоимостные показатели, чем сопловой насадок второго варианта, и более высокие, чем третьего варианта.

Для каждого конкретного предназначения ракетного двигателя может оказаться решающим то или иное из вышеприведенных качеств соплового насадка, таким образом, что все три варианта изготовления сопловых насадков одновременно оказываются актуальными и востребованными. [6] Следует отметить, что схема с применением насадки на сверхкритическую часть сопла была реализована в конструкции двигателя НК -33-1.

Второй способ увеличения значения тяги сопла -это применение различных вставок или добавление в конструкцию еще одного элемента.

Увеличение тяги сопла при заданных габаритах сопла, не изменяя его контур возможно путем установки внутренней вставки. Автор рекомендует вставку для конических сопел, так как основные расчеты проводил именно для них. Вставка располагается вблизи выходного сечения и не оказывает влияния на обтекание стенки сопла. Нижняя часть рисунка 9 соответствует соплу без вставки, а верхняя — соплу с внутренней вставкой.

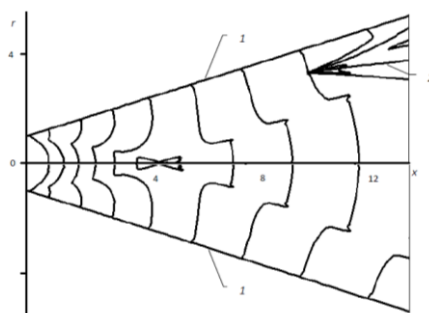


Рисунок 9. Изомахи в коническом сопле; 1- стенка сопла; 2- вставка

В центральной части потока располагается протяженная область пониженного давления, ограниченная фронтом висячего скачка уплотнения. Область влияния вставки ограничена поверхностями скачков уплотнения (с внутренней стороны вставки) и волн разрежения (с внешней стороны вставки). Волны разрежения, образующиеся при обтекании вставки, не попадают на стенку сопла, что свидетельствует об отсутствии аэродинамической интерференции, то есть влияние обтекания одних частей на обтекание других его частей, отсутствует. В результате увеличения давления на внутренней поверхности и уменьшения давления на внешней поверхности вставки создается дополнительная тяга.

Конический отражатель устанавливается с целью повышения качества работы сопла в его канале на поверхности отражателя равномерно по круговому сечению размещены разрядники многофазной системы в виде двух пар электроразрядных электродов на каждую фазу, расположенных с противоположных сторон отражателя, которые соединены с источником многофазного по числу фаз разрядника напряжения посредством тиристорной схемы формирования разрядов регулируемой частоты.

При включении электропитания разрядников с заданной частотой ударные волны разрядов образуют общую ударную волну в направлении раствора сопла, что создает дополнительное давление как напор электроразрядного насоса и приводит к возрастанию скорости истечения струи (рис. 11).

В данном случае, сопло ракетного двигателя состоит из сверхзвукового сопла 1 в корпусе 2, внутри сопла 1 по его оси установлен на кронштейнах 3 обтекаемого сечения

отражатель 4 в виде обтекаемого тела конической формы, ориентированный вершиной конуса на выход сопла. И размещены пары электроразрядных электродов 5 многофазной системы разрядников по две пары электродов 5 на каждую фазу, размещенных с противоположных сторон отражателя 4, которые соединены с источником многофазного по числу фаз разрядника напряжения посредством тиристорной схемы формирования разрядов регулируемой частоты. [7]

Опытным путем установлено, что недостатком является условие работы конического отражателя, нужно учитывать данные факторы, при выборе модификации сопла: тепловые и эрозионные воздействия высокотемпературного газового потока в течение всего времени работы двигателя; наличие механических нагрузок от сверхзвукового потока в течение всего времени работы двигателя.

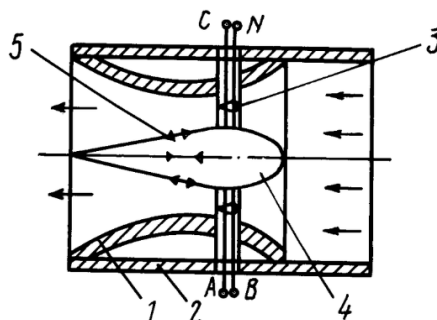


Рисунок 10. Схема конического отражателя

Основной задачей сопла ракетного двигателя является повышение тяги и надежная работа. Все модификации сопел создаются с целью повышения тяги ракетного двигателя и уменьшения потерь в нем. Также модификации создают с целью унификации сопел, что способствует эффективности для ракет-носителей с разными геометрическими и тяговыми характеристиками, что снизит затраты на производство сопел. Это позволит выбирать наиболее экономически выгодное решение.

Список использованных источников

1. Егорычев В. С. Конспекты лекций по учебной дисциплине «Теория, расчет и проектирование ракетных двигателей». – Самара, 2011, 143 с.
2. Моравский А. В., Файн М. А. Огонь в упряжке, или Как изобретают тепловые двигатели. — М.: Знание, 1990.
3. Таковицкий С. А. Увеличение тяги сопла заданных габаритов. - М.: Ученые записки, 2014.
4. В. В. Семенов, И. Э. Иванов, И. А. Крюков. Двухконтурное щелевое сопло ракетного двигателя. – М.: Вестник ПНИПУ, 2016.
5. <https://patenton.ru/patent/RU2686367C1>
6. <https://patenton.ru/patent/RU2266424C2>
7. <https://ru.wikipedia.org/>