

*Сарычев С.С.,
электроэрозионист 4-ого разряда
АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко»
Россия, г. Химки*

СОПЛА РАКЕТ: КРАТКИЙ ОБЗОР

***Аннотация:** статья посвящена аэродинамическим аспектам ракетных сопел, разработанных на сегодняшний день, и обобщает основные понятия, касающиеся их проектирования, разработки, использования, преимуществ и недостатков.*

***Ключевые слова:** сопло ракеты, аэродинамика, коэффициент расширения, контур сопла, ударная волна, конструкция ракетного двигателя.*

***Annotation:** the article mainly focuses on the aerodynamic aspects of the rocket nozzles developed to date and summarizes the major findings covering their design, development, utilization, benefits and limitations.*

***Key words:** rocket nozzle, aerodynamics, expansion ratio, nozzle contour, shock wave, rocket engine design.*

В 1890 г. Карл Густав Патрик де Лаваль разработал конвергентно-расширяющееся сопло, способное преобразовать поток в канале сопла в сверхзвуковой поток [1]. Это сопло было названо соплом де Лавалья и позже использовалось в ракетных двигателях. Инженер Роберт Годдард первым интегрировал сопло де Лавалья в камеру сгорания, тем самым увеличив коэффициент полезного действия и получив сверхзвуковую скорость ракеты [1].

Ракета является системой, несущей необходимый объём топлива и в определённый момент выбрасывающей эту массу с высокой скоростью для

обеспечения тяги. Ракетный двигатель создаёт эту тягу, разгоняя выхлопные газы до нужной скорости и передавая им направление. Иначе выражаясь, сопло использует давление, создаваемое внутри камеры сгорания, для увеличения величины тяги за счёт ускорения продуктов сгорания до сверхзвуковой скорости.

Энергия, выделяемая при сгорании топлива, должна удерживаться внутри камеры сгорания, а впоследствии направляться в сопло для создания тяги. При этом максимальные температуры наблюдаются в непосредственной близости от горловины сопла, и эффективное охлаждение области критического сечения имеет решающее значение для повышения надёжности и долговечности конструкции [2, с. 31].

Сопло составляет большой сегмент конструкции ракетного двигателя, и в целом характеристики ракеты во многом зависят от его аэродинамической конструкции. Основными параметрами при этом являются форма контура сопла и коэффициент расширения площади сопла. Тщательное формирование контура сопла может привести к значительному увеличению его производительности.

Идеальное сопло создаёт изоэнтропический поток (без внутренних скачков давления) с равномерной скоростью на выходе. Скорость на выходе можно регулировать коэффициентом расширения сопла или коэффициентом площади (значение выходной площади сопла, делённое на значение площади горловины).

Разработка новых ракетных сопел для ракет-носителей сталкивается со сложной конструктивной проблемой. Чтобы соответствовать производительности сопла на больших высотах, они спроектированы с большим коэффициентом площади. Однако при эксплуатации на малых высотах это приводит к чрезмерному расширению потока. При этом выходное давление сопла становится ниже давления окружающей среды. Эти условия влекут за собой нестационарный отрыв внутреннего потока, что приводит к

возникновению латеральных нагрузок, которые могут привести к повреждению всей пусковой системы. Латеральные нагрузки большой величины внутри сопел является одним из наиболее важных вопросов, рассматриваемых при проектировании многоразовых, прочных и эффективных ракет-носителей [3, С. 04017041].

Тяга сопла ракеты становится оптимальной, когда на выходе имеется параллельный однородный поток и давление на выходе равно давлению окружающей среды, но это делает сопло более длинным и тяжёлым.

Разработчики ракетных сопел всегда сталкиваются с проблемой поиска решения, позволяющего использовать сопло меньшего размера для получения более высокого удельного импульса, при этом максимально экономя средства и упрощая конструктивную сложность. Минимальная сложность конструкции, относительно небольшой вес, максимальная производительность и простота изготовления – вот некоторые из основных желаемых характеристик ракетного сопла.

За последние несколько десятилетий в результате интенсивных исследований конструкция и форма сопел ракет претерпели ряд изменений. Среди них выделяются конические, раструбные, пробковые, тарельчатые, двухрежимные сопла, а также разработанная недавно плоская многосопловая решётка [4, с. 1].

Коническое сопло является простым в изготовлении и имеет гибкость преобразования существующего дизайна в более низкое или более высокое соотношение площадей без значительного изменения дизайна. Коэффициент тяги конического сопла равен 15, что лишь на 1,7% меньше, чем у идеального сопла [4, с. 17]. Устранение ударной нагрузки в коническом сопле возможно путём модификации контура стенки вблизи стыка профиля горловины и конуса. Основной недостаток заключается в компромиссе между углом расходимости и длиной сопла.

Раструбное сопло используется в ракетных двигателях чаще других видов сопел. Сопло данного типа имеет значительные преимущества по размеру и производительности по сравнению с коническим. Потеря тяги в коническом сопле из-за расходимости потока может быть уменьшена при использовании раструбного сопла. Латеральная нагрузка, измеренная в усечённом идеальном сопле, составляет около 33,33% от латеральной нагрузки в сопле с оптимизированной тягой [4, с. 17]. Использование параболической аппроксимации является наиболее простым методом оптимизации контура раструбного сопла.

Длина пробкового сопла значительно меньше аналогичного сопла Лавалья. Такой тип сопла предназначен для компенсации высоты. Основным свойством пробкового сопла является его взаимодействие с внешней средой, способное устранить разделение потока. Пробковое сопло обладает преимуществом в тяге по сравнению с соплом Лавалья, когда оно работает ниже расчётного коэффициента давления. Тяговая характеристика пробкового сопла примерно на 5–6% больше, чем у конического сопла. Усечение пробкового сопла на 50% приводит лишь к 0,5% снижению его производительности [4, с. 18]. Основным недостатком сопла является относительно высокая потребность в охлаждении.

Длина тарельчатого сопла примерно такая же, как у пробкового сопла для эквивалентной мощности тяги. Для той же производительности, что и у раструбного сопла, необходимая длина тарельчатого сопла составляет всего 50% от длины раструбного сопла. Коэффициент тяги тарельчатого сопла на 25-100% больше, чем у сопла Лавалья [4, с. 18]. Поскольку камера сгорания ракетного двигателя с тарельчатым соплом имеет компактные размеры, она обладает определёнными преимуществами в отношении веса и требований к охлаждению. Когда требуется очень высокая степень расширения, лучшим выбором является сопло тарельчатого типа.

Преимущество двухрежимных сопел заключается в максимальной эффективности на больших высотах и отсутствии латеральных нагрузок на малых высотах. Такое сопло обеспечивает достаточную тягу, чтобы производить на 12,1% больше полезной нагрузки по сравнению с обычным соплом Лавалья, имеющим ту же степень расширения [4, с. 18]. Основными преимуществами двухрежимного сопла являются возможность контролировать разведение потока, а также простота конструкции и высокая надёжность. Величина теплового потока в двухрежимном сопле увеличивается в области перегиба контура для обоих режимов работы. Поток во время медленного перехода очень нестационарен, что является основной причиной возникновения латеральной нагрузки в двухрежимном сопле перед окончательным переходом. Двухрежимное сопло обеспечивает исключительное сочетание производительности, надёжности, небольшого веса и простоты охлаждения.

В плоской многосопловой решётке экономия длины прямо пропорциональна квадратному корню из числа сопел. Это единственная конфигурация сопла, в которой отношение длины сопла (толщины пластины) к диаметру горловины может быть меньше единицы, но способно обеспечить чрезвычайно высокое отношение площадей. Потери вязкости в плоской многосопловой решётке снижают её эффективность на 3% по сравнению с эквивалентным одиночным соплом. Однако по сравнению с обычным одиночным соплом, за счёт экономии массы и длины система плоской многосопловой решётки может повысить производительность более чем на 11% [4, с. 18].

Таким образом, каждая конструкция имеет свои сильные и слабые стороны, и нет ни одной конструкции, которая явно превосходила бы другие. Скорее, выбор конкретной конструкции является результатом тщательного поиска компромисса между различными факторами, такими как производительность, надёжность, механическая сложность, технологичность,

вес и стоимость. Влияние на выбор оказывает и то, как эти факторы ранжируются по порядку важности. Основываясь на том, какие конструкции более популярны, отметим, что двухрежимные сопла, из-за их простоты, и плоские многосопловые решётки, из-за их меньшей длины, кажутся наиболее привлекательными, однако вопрос имеет дискуссионный характер и напрямую зависит от целей использования сопел.

Использованные источники:

1. Linares M., Robaina A.C. M. Design Optimization of Supersonic Nozzle // Florida university. – 2015.
2. Сарычев С.С. Плёночное охлаждение жидкостных ракетных двигателей // VI МНПК «Наука и Просвещение: актуальные вопросы, достижения и инновации». – Пенза, 25 февраля 2022. – С. 31.
3. Zhang J.A., Shotorban B., Zhang S. Numerical experiment of aeroelastic stability for a rocket nozzle // Journal of Aerospace Engineering. – 2017. – Т. 30. – № 5. – С. 04017041.
4. Khare S., Saha U.K. Rocket nozzles: 75 years of research and development // Sādhanā. – 2021. – Т. 46. – № 2. – С. 1-18.