Государственная корпорация по космической деятельности Роскосмос

Министерство просвещения Российской Федерации

**МЕТОДИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА**

**УРОКА №37**

по программе

**Аэродинамика и баллистика**

На тему:

«Скорость К.Э. Циолковского. Потери скорости»

г. Москва, 2020 г.

***Пояснительная записка***

Рассматриваются барометрические потери тяги ракетного двигателя. Вводится понятие «расчетный режим работы сопла». Предлагаются меры по уменьшению данного вида потерь.

Реактивный, а как частный случай – ракетный, двигатель работает с максимальной эффективностью на так называемом расчетном режиме, когда давление, пришедшее из двигателя на срез сопла, равно атмосферному давлению. Поскольку атмосферное давление зависит от высоты полета, а траектории баллистических ракет и ракет-носителей космических аппаратов пересекают по вертикали почти всю атмосферу, то обеспечение приемлемого режима работы двигателя – неординарная задача.

Рассмотрено отличие сопла двигателя первой ступени от второй. Предложены схемы изменения высотности сопла в полете.

Во время урока предусмотрено использование различных приемов обучения, современных ТСО, наглядности, презентации MicrosoftPowerPoint.

***ТЕМА УРОКА***:Скорость К.Э. Циолковского. Потери скорости.

***ЦЕЛЬ УРОКА:***

* Рассмотреть барометрическиепотери скорости ракеты и меры по их снижению.
* Изучить понятие «расчетный режим работы сопла».
* Рассмотреть конструктивные решения, позволяющие изменять высотность сопла в процессе полета.

***НАГЛЯДНЫЕ ПОСОБИЯ***: презентация.

***ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА***:компьютер, проектор, экран.

***ВИД УРОКА***:урок «открытия» нового знания.

***ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ УРОКА:*** 45 минут.

***ХОД УРОКА***:

1. *ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ МОМЕНТ* (5 минут)

Учитель приветствует учащихся.

Учитель побуждает к предположениям о предстоящей теме урока,задавая наводящие вопросы опотерях тяги ракетного двигателя.Ожидаемые ответы:

* тяга двигателя зависит от разности давлений в камере сгорания и в атмосфере;
* при расширении потока давление в нем падает;
* тяга создается до тех пор, пока давление на срезе сопла выше атмосферного.

Учащиеся определяют тему и цели урока, а также личностное отношение к предлагаемой теме.

1. *ПОВТОРЕНИЕ ПРОЙДЕННОГО МАТЕРИАЛА* (5 минут)

Учитель проводит устный опрос учащихся по домашнему заданию:

1. Что является причиной гравитационных потерь скорости?
2. Почему баллистические ракеты стартуют вертикально?
3. Какие меры позволяют уменьшить аэродинамические потери?
4. Почему гравитационные и аэродинамические потери – антагонисты?
5. *ИЗУЧЕНИЕ НОВОГО МАТЕРИАЛА*(25 минут)

Сегодня более подробно рассмотрим, от каких параметров зависит тяга ракетного двигателя. Тягой принято называть равнодействующую сил давления, приложенных к ракете. Из рисунка слева видно, что горизонтальные составляющие этих сил компенсируют друг друга. Таким образом, остается только вертикальная проекция сил давления. Она и определяет тягу.

Уравнение Циолковского утверждает, что конечная скорость ракеты зависит от так называемого «удельного импульса» двигательной установки, т.е. скорости потока на выходе из сопла. Для математического описания течения жидкости или газа используется уравнение Эйлера. Ввиду его так называемой дифференциальной природы, приводить здесь это уравнение не будем. Скажем только, что из него следует, что для разгона дозвукового потока требуется сужающийся канал, а сверхзвукового – расширяющийся.

Разгон внутри канала постоянного сечения возможен только за счет постоянного подвода тепла к движущейся среде. Поэтому такой способ практически не используется.

Сочетание сужающегося дозвукового и расширяющегося сверхзвукового участков получило название «сопло Лаваля». Самое узкое сечение часто ошибочно называют критическим. В действительности понятие «критическое сечение» характеризует не форму канала сопла, а режим течения в нем. Это сечение, в котором скорость потока становится равной так называемой «местной скорости звука». Оно может находиться в любом месте сужающегося канала. Но сверхзвуковой поток в сужающемся канале тормозится с образованием скачков уплотнения. В итоге если критическое сечение в потоке существует, то оно занимает самое узкое место сопла.

Согласно приведенной формуле, скорость звука можно найти как квадратный корень из отношения произведения постоянной адиабаты, универсальной газовой постоянной и температуры к молярной массе газа. В этой формуле отсутствуют такие параметры, как давление и плотность газа. Но помимо нее есть уравнения, связывающие эти параметры.

Максимально эффективно сопло работает тогда, когда давление, приходящее на срез из камеры сгорания, равно атмосферному на высоте полета. Но атмосферное давление с высотой снижается, что демонстрирует график справа. В сверхзвуковом потоке давление снижается по мере его расширения. Снизить давление на срезе можно двумя способами.

Первый способ – газодинамический. Давление можно снизить, снижая давление в камере сгорания. Для этого в жидкостных двигателях используют так называемое «дросселирование тяги», уменьшая подачу компонентов в камеру. В твердотопливных двигателях используют топливные шашки с регрессивным режимом горения.

Но уменьшение давления в камере означает, что нагрузки на ее конструкцию также уменьшатся. Прочностные расчеты выполняются по максимальным нагрузкам. Значит, камера будет обладать излишней прочностью, т.е. весом. Это допустимо только в ограниченном масштабе.

Второй способ – конструкционный. Как уже говорилось выше, давление снижается при расширении потока. Значит можно снизить давление на срезе, увеличивая так называемую степень расширения сопла, т.е. отношение площади среза сопла к площади критического сечения.

Существуют два способа сделать это. Первую возможность предоставляет многоступенчатость больших ракет. Соответственно для первой ступени сопло имеет небольшую степень расширения, а для второй – в разы больше. При этом секундный массовый расход на второй ступени значительно меньше, чем на первой. Это позволяет уменьшить объем камеры сгорания.

Второй способ связан с изменением степени расширения сопла без замены всего двигателя. Наиболее частое решение такого плана – использование соплового насадка. На начальной стадии работы такого двигателя насадок поднят вверх. Верхний срез сопла является нижним габаритом ракеты. В разряженных слоях атмосферы насадок опускается и становится продолжением сопла, позволяя получить дополнительную тягу.

Наряду с этим существует еще одно решение. Длина сопла остается постоянной, а закрашенная на рисунке справа часть заполняется разрушающимся в процессе работы двигателя материалом. Такие абляционные покрытия ранее уже использовались в качестве теплозащитных. Основная проблема этого решения в том, что температура газа по мере его расширения (сверху вниз) уменьшается, а толщина покрытия увеличивается. Поэтому свойства материала покрытия в разных его точках должны быть различны. Такие материалы называют анизотропными.

Чтобы минимизировать барометрические потери, сопло создается таким, что в начале работы двигателя давление на срезе меньше атмосферного. Такой режим работы называют перерасширением. Если давление в струе более чем в два раза ниже атмосферного, образуется особая структура, пересекающая поток и называемая «диск Маха». Ее хорошо видно на данном видео.

В процессе подъема ракеты атмосферное давление уменьшается. На некоторой высоте двигатель выходит в расчетный режим работы. Далее режим работы становится недорасширенным.

Если сила, действующая на стенку сопла изнутри, будет значительно меньше, чем снаружи, то атмосферное давление проникнет внутрь сопла. Это приведет к тому, что текущий по соплу поток оторвется от стенки. Соответственно площадь сопла, участвующая в создании тяги, уменьшится, уменьшая и саму тягу.

1. *ЗАКРЕПЛЕНИЕ ИЗУЧЕННОГО МАТЕРИАЛА И ОТРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ УМЕНИЙ*(5 МИНУТ)

Учитель задает контрольные вопросы:

1. Что является причиной барометрических потерь?
2. Какое сечение сопла называют критическим?
3. Возможен ли запуск спутника одноступенчатой ракетой?
4. *ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ* (5 минут)

По завершению урока учитель объясняет ход выполнения домашнего практического задания для закрепления изученного теоретического материала. Задание №40 в рабочей тетради.

Опорный конспект

* 1. Организационный момент (5 минут).
  2. Повторение пройденного материала (5 минут)
  3. Изучение нового материала (25 минут).
  4. Закрепление изученного материала и отработка практических умений (5 минут).
  5. Домашнее задание (5 минут).

## Список литературы

## Основная литература

1. Мхитарян, А.М. Аэродинамика/ А.М. Мхитарян. - ЭКОЛИТ, 2012.
2. Бережко Е.Г. Введение в физику космоса/ Е.Г. Бережко. - ФИЗМАТЛИТ, 2014.
3. Хомич Е.О. Космос/ Е.О. Хомич. - АСТ, 2016.
4. Авдеев Ю.Ф. Космос, баллистика, человек/ Ю.Ф.Авдеев. - Высшая школа, 2013.
5. Граве И.П. Внутренняя баллистика. Пиродинамика/ И.П. Граве. - 2014.
6. Дэвис Л., Внешняя баллистика ракет / Л.Девис, Дж. Фоллин, Л. Блитцер. - Воениздат, 2000.