

РАСЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ СОПЛОВОГО БЛОКА РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

Уланов Д.Д.¹, Ворожеева О.А.¹

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, ulanovdan2015@gmail.com

Ключевые слова: тепловое состояние, сопловой блок, ракетный двигатель на твердом топливе, математическое моделирование

Проектирование ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ) связано с решением широкого круга инженерных задач, направленных на обеспечение требуемых внутрибаллистических характеристик и надежности конструкции двигателя. Одной из ключевых проблем является обеспечение термостойкости конструкции РДТТ. В процессе работы РДТТ его основные узлы и элементы конструкции испытывают значительные тепловые нагрузки в условиях невозможности организации наружного проточного охлаждения, которое широко применяется в жидкостных ракетных двигателях. Перегрев элементов конструкции может привести к снижению прочностных характеристик и повреждению конструкции, что обуславливает применение в конструкции РДТТ различных теплозащитных материалов (ТЗМ). В сопловом блоке, особенно в окрестности критического сечения, разгар которого не допускается, применяют ТЗМ, которые весь рабочий период сохраняют неизменной свою первоначальную геометрическую форму. Эти материалы сочетают высокую теплоемкость, большую температуру разрушения (плавления, сублимации или начала интенсивного химического разрушения с уносом) и относительно низкую температуро- и теплопроводность. При выборе конкретного ТЗМ на этапе проектирования двигателя необходимо оценивать тепловое состояние элементов конструкции РДТТ. Это можно сделать на основе результатов численного моделирования с учетом уровней тепловых потоков и времени их воздействия на элементы конструкции двигателя, что в настоящее время является актуальным.

Целью работы является получение температурных полей в сопловом блоке РДТТ на основе математического моделирования и анализ риска превышения предельно допустимых температур в конструкции.

Математическая модель теплового состояния соплового блока РДТТ основана на решении двумерного уравнения нестационарной теплопроводности в цилиндрических координатах. На внутренней поверхности сопла задан суммарный тепловой поток от продуктов сгорания, включающий конвективную и радиационную составляющие. Конвективная составляющая теплового потока рассчитывалась по методике В.С. Авдеевского [1], которая нашла широкое применение в ракетно-космической отрасли ввиду удовлетворительной достоверности полученных результатов и заключается в расчете коэффициентов конвективного теплообмена в характерных зонах газового тракта РДТТ, характеризующихся конкретными значениями теплофизических и газодинамических параметров рабочего тела. Радиационная составляющая теплового потока определялась с учетом излучения гетерогенных продуктов сгорания. Наружная поверхность сопла охлаждалась за счет радиационного излучения, что соответствует условиям работы двигателя в космическом пространстве. На границах между различными материалами обеспечивалось согласование тепловых потоков.

При моделировании принято, что давление, температура и теплофизические свойства продуктов сгорания в каждом сечении проточного тракта сопла постоянны во времени и определяются по результатам термодинамического расчета в программном комплексе «Terra» [2], а контакт между различными материалами конструкции принят идеальным – без учета термического сопротивления на границе.

Сопловой блок включает в себя воротник из углерод-углеродного композиционного материала, вкладыш критического сечения сопла из пиролитического графита и облицовку

вкладыша критического сечения сопла из сплава ВНДС. Входной вкладыш, теплозащитное покрытие (ТЗП) внешней поверхности утопленной части сопла и ТЗП расширяющейся части сопла выполнены из углепластика. Силовая оболочка сопла стальная. При моделировании теплового состояния химическая деструкция конструкционных материалов сопла не учитывалась.

Математическая модель теплового состояния соплового блока РДТТ реализована в виде программы в среде Mathcad. В программу внесены справочные данные по теплофизическим свойствам различных конструкционных и теплозащитных материалов, что позволяет проводить расчеты для различных вариантов исполнения соплового блока.

В результате расчета получены температурные поля в элементах конструкции соплового блока. Наиболее теплонагруженной зоной соплового блока является область критического сечения.

Разработанная математическая модель позволяет определять потенциальные участки превышения температурных пределов и проводить оценку термической надежности конструкции в процессе работы РДТТ.

Результаты работы могут быть использованы для оценки термической надежности сопловых блоков на этапе проектирования, а также при выборе конструкционных и теплозащитных материалов с учетом нестационарного теплового состояния в процессе работы двигателя.

Список литературы

1. Панин С.Д., Румянцев Б.В., Шишков А.А. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива: Справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 420 с.
2. Трусов Б.Г. Программная система моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах. Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение, 2012, № 2 (спецвып.): Программная инженерия, с. 240-249.

Сведения об авторах

Уланов Данила Дмитриевич – студент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область деятельности и научных интересов: тепловое состояние элементов конструкции ракетных двигателей твердого топлива. e-mail: ulanovdan2015@gmail.com.

Ворожеева Олеся Андреевна – к.т.н., доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область деятельности и научных интересов: жидкостные ракетные двигатели малой тяги, численное моделирование и экспериментальное исследование характеристик рабочего процесса в ракетных двигателях, тепловое состояние элементов конструкции ракетных двигателей. e-mail: oa-vorozheeva@bmstu.ru.

CALCULATION OF THE TRANSIENT THERMAL STATE OF THE NOZZLE BLOCK OF A SOLID FUEL ROCKET ENGINE

Ulanov D.D.¹, Vorozheeva O.A.¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow

The work presents a numerical simulation of the non-stationary thermal state of the nozzle block of a solid-fuel rocket engine operating in outer space. The mathematical model takes into account the features of heat exchange on the inner and outer walls of the nozzle block, as well as the properties of the structural materials.