

УДК 533.9.01

Расчет параметров электризации сопла ракетного двигателя твердого топлива

Онуфриев Валерий Валентинович (*)

onufryev@bmstu.ru

Ягодников Дмитрий Алексеевич

daj@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Проведено исследование распределения потенциала между непроводящей стенкой сопла ракетного двигателя и потоком продуктов сгорания с учетом радиального распределения температуры продуктов потока. Расчет амбиполярного потенциала в осесимметричной постановке задачи проведен на основе уравнения диффузии ионов с учетом химических реакций в потоке ПС. Представлены распределения амбиполярного потенциала в слое в зависимости от геометрической степени расширения сопла.

Ключевые слова: электризация, ракетный двигатель, сопло, амбиполярная диффузия, градиент электронного давления, амбиполярный потенциал

Введение. Одним из основных источников зарядов статического электричества летательных аппаратов являются ЖРД и РДТТ, из сопел которых истекает ионизированный поток продуктов сгорания. Этот эффект может быть причиной электрических пробоев, помех системам управления и радиосвязи, возмущающего воздействия. Кроме того, информация о электрофизических параметрах плазменных потоков актуальна для оптимизации физико-химических процессов в камере сгорания, контроля аварийных ситуаций, управления режимными параметрами.

Методы и материалы; результаты. Расчетным методом проведено исследование электризации сопла РДТТ. Топливо (ПХА/НТРВ/АI, состав $\text{NH}_4\text{ClO}_4\text{--C}_{7,079}\text{H}_{10,65}\text{O}_{0,223}\text{N}_{0,063}\text{--Al}$, содержание 0,68/0,14/0,18) [1]. Основной механизм образования и рекомбинации ионов обусловлен реакциями хемо ионизации и рекомбинации. Давление в камере модельного РДТТ составляло 4,5 МПа, сопло конической формы. Получены величины концентраций компонентов потока продуктов сгорания (ПС) при помощи программного комплекса «TERRA» [2].

Уравнение амбиполярной диффузии для ионов имеет вид

$$\frac{d^2 n_i}{dy^2} = -\frac{\Gamma_{ion}}{D_{амб}} + \left(-\frac{k_{rec}}{D_{амб}}\right) \cdot n_i^2,$$

где $D_{амб}$ — коэффициент амбиполярной диффузии, Γ_{ion} — скорость ионизации; k_{rec} — константа скорости рекомбинации, n_i — концентрация ионов в амбиполярном слое, y — координата по толщине слоя в радиальном направлении.

Константы скоростей реакций ионизации и рекомбинации для Al и HCl (границы применения: температура 500...4000 К, давление 0,1...5 МПа) взяты из [3, 4]. Решение уравнения проведено в программном комплексе Mathcad [5] для распределения концентрации ионов совместно с уравнением Пуассона позволило для равновесного потока ПС получить распределение амбиполярного потенциала по глубине слоя.

Заключение. Максимальное значение амбиполярного потенциала составляло –2,56 В в критическом сечении. Дальнейшее уменьшение амбиполярного потенциала в процессе расширения потока продуктов сгорания в сопле связано со снижением концентрации заряженных частиц по длине сопла, сопровождающемся уменьшением температуры и степени ионизации плазмы продуктов сгорания. Толщина амбиполярного слоя, при характерных размерах сопла, не превышала 1 % от размеров поперечного сечения, иными словами, падение потенциала было сосредоточено в узком пристеночном слое.

Список источников

- [1] Соколов Б.И., Черенков А.С., Саломыков А.И. *Термодинамические и теплофизические свойства твердых ракетных топлив и их продуктов сгорания*. Москва, Изд-во Министерства обороны СССР, 1977.
- [2] Трусов Б.Г. TERRA — *Моделирование фазовых и химических равновесий*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013.
- [3] Andreazza C.M., de Almeida A.A., Vichiatti R.M. Formation of AlCl by radiative association. *Monthly Notices of the royal astronomical society*, 2018, no. 477, pp. 548–551.
- [4] Guy A., Fromentin-Denoziere B., Phan H.-K. et al. Ionized Solid Propellant Rocket Exhaust Plume: Miles Simulation and Comparison to Experiment. 7th European conference for aeronautics and space sciences (EUCASS), 2017. <https://doi.org/10.13009/EUCASS2017-434>
- [5] Новиковский Е.А. *Учебное пособие «Работа в системе MathCAD»*. Барнаул, Типография АлтГТУ, 2013, 114 с.