

УДК 533.9:621.455.4:519.6

Распределение мощности излучения импульсного разряда на поверхности полимера в канале абляционного импульсного плазменного двигателя

Гембар Максим Игоревич^(*)

gembarmi@student.bmstu.ru

Данилов Вадим Максимович

danilovad@bmstu.ru

Егошин Денис Андреевич

egoshinda@bmstu.ru

Телех Виктор Дмитриевич

telekh@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Одной из проблем моделирования рабочего процесса абляционного импульсного плазменного двигателя является отсутствие данных о распределении энергии излучения на рабочей поверхности диэлектрика. Одним из способов решения данной проблемы является моделирование излучения плазмы в канале. Разработана математическая модель, реализующая расчет пространственного распределения мощности излучения дугового разряда в канале абляционного импульсного плазменного двигателя. Модель позволяет производить расчет как для рельсовой, так и коаксиальной геометрии ускорительного канала. Полученные результаты могут быть использованы при моделировании взаимодействия излучения с поверхностью диэлектрика и последующей абляции.

Ключевые слова: абляционный импульсный плазменный двигатель, моделирование абляции, плазма, численные методы, рабочие тела, дуговой разряд

Введение. В настоящее время в качестве искусственных спутников Земли широко распространено применение сверхмалых космических аппаратов (СКА), например, класса CubeSat [1]. Уменьшение габаритов компонентов в СКА существенно снижает стоимость запуска. При проектировании СКА возникает проблема в создании компактного и недорогого микродвигателя. Вариантом такой двигательной установки является абляционный импульсный плазменный двигатель (АИПД), одним из главных преимуществ которого является твердое рабочее тело, позволяющее исключить дополнительные системы хранения и подачи топлива, обеспечивая при этом длительный срок службы. Рабочий процесс предполагает использование диэлектрика в качестве плазмообразующего вещества, как правило, применяют полимеры.

Принцип работы АИПД заключается в абляции диэлектрика под действием излучения плазмы, последующей ионизации аблированной массы и ее ускорении в разряде за счет пондеромоторных сил [2]. Процесс абляции полимера в канале АИПД на сегодняшний день остается малоизученным, что обусловлено комплексностью и многопараметричностью явления. Один из подходов — учитывать только влияние теплового излучения дугового разряда на диэлектрик [3]. Целью работы являлась разработка математической модели, позволяющей получить пространственное распределение мощности излучения в канале АИПД.

Методы и материалы; результаты. Плазма рассматривалась как объемный источник излучения. Объемная плотность потока излучения q_v рассчитывается по закону Стефана — Больцмана: $q_v = 4\kappa\sigma T^4$, где σ — это постоянная Стефана — Больцмана; κ — оптическая толщина, рассчитанная с использованием спектральных характеристик излучения плазмы, определяемых для конкретного состава рабочего тела; T — температура плазмы, оценка которой проводилась на основании уравнения баланса энергий с использованием экспериментальных данных (удельной аблированной массы, импульса силы) и расчета изобарной теплоемкости плазмы.

В разработанной модели канал АИПД разбивается на сетку, в узлах которой задаются значения температуры. Затем последовательно из всех узлов поверхности диэлектрика эмитируются лучи равномерно по полупространству в канал АИПД. После этого определяется суммарное воздействие излучения на элементарную площадку путем последовательно интегрирования объемной плотности потока излучения вдоль каждого луча. Дополнительно учитывались потери, обусловленные отклонением угла падения излучения от нормали и снижением интенсивности излучения при отдалении источника от приемной поверхности.

Заключение. Разработанная модель позволяет рассчитать пространственное распределение мощности излучения дугового разряда в канале АИПД. Полученная плотность мощности излучения на поверхности рабочего тела может быть использована при рассмотрении процесса абляции.

*Работа выполнена на уникальной научной установке (УНУ) «Пучок-М»
МГТУ им. Н.Э. Баумана, при поддержке Министерства науки
и высшего образования Российской Федерации
по государственному заданию FSN-2024-0007.*

Список источников

- [1] Villela T., Costa C., Brandão A., Bueno F. et al. Towards the thousandth CubeSat: A statistical overview. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2019, vol. 2019 (1), art. no. 5063145. <https://doi.org/10.1155/2019/5063145>
- [2] Egoshin D.A., Fedorova D.K., Pasyukova D.S., Pavlov A. et al. Estimation of the Propellant Ablation Rate in a Pulse Discharge. *High Energy Chemistry*, 2024, vol. 58 (Suppl 2), pp. 137–141. <https://doi.org/10.1134/S0018143924700759>
- [3] Wu J., Li J., Zhao Y., Zhang Y. *Numerical Simulation of Pulsed Plasma Thruster*. Singapore, Springer Nature, 2025, 301 p.