

УДК 533.9.02

Оценка влияния уравнений состояния на распределение параметров в абляционном импульсном двигателе

Андрющенко Илья Сергеевич^(*)

ais21ea072@student.bmstu.ru

Егошин Денис Андреевич

egoshinda@bmstu.ru

Телех Виктор Дмитриевич

telekh@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В рамках настоящей работы рассматривается применение различных уравнений состояния для определения распределения параметров расчетной области при численном моделировании разряда в абляционном импульсном плазменном двигателе (АИПД). Выполнен сравнительный анализ результатов расчетов, на основании которого сформированы рекомендации по применению уравнений состояния в требуемом диапазоне параметров. Оценена повторяемость результатов при использовании различных уравнений состояния.

Ключевые слова: абляционный импульсный плазменный двигатель, плазма, уравнения состояния, высокоэнтальпийные потоки

Введение. В настоящее время все большую популярность приобретают малые спутники, в том числе основанные на платформе класса CubeSat. Их основное преимущество перед полноразмерными — возможность выполнения широкого спектра задач на околоземных орбитах при низкой стоимости и быстрой сборке [1]. Однако такие спутники имеют короткий срок службы.

Увеличение времени жизни на орбите может быть достигнуто за счет использования электрических двигательных установок, позволяющих корректировать орбиту на протяжении всей миссии. Кроме того, малые размеры и низкое энергопотребление двигательной установки, установленной на платформе CubeSat, должны обеспечивать максимальную тягу. На сегодняшний день существует несколько возможных вариантов двигательных установок для платформы CubeSat [2, 3], одной из перспективных является абляционная импульсная плазменная тяга.

Несмотря на то, что АИПД используются уже более 60 лет [4] в физике работы двигателя остается много нерешенных проблем, связанных со сложностью и быстротой процессов в разряде. Это же затрудняет проведение экспериментальных исследований, что определяет необходимость разработки математических моделей, описывающих внутренние процессы в двигателе.

Важным моментом при составлении численных моделей является выбор уравнения состояния, корректно описывающего происходящие процессы при характерных параметрах системы. При работе АИПД газ в объеме двигателя ионизован и находится при высоких температурах порядка 1...5 эВ, что выходит за рамки применимости приближений идеального газа и актуализирует проблему выбора наиболее подходящего уравнения состояния.

Материалы и методы; результаты. В рамках проведенной работы рассмотрены возможности применения различных уравнений состояния для взаимосвязи термодинамических параметров плазмы. Были рассмотрены следующие уравнения состояния: уравнение идеального газа, уравнение идеального газа с поправкой Дебая — Хюккеля, уравнение Соаве — Редлиха — Квонга, уравнение состояния плазмы с учетом взаимодействия молекулярных частиц, уравнение состояния плазмы с учетом члена неидеальности второго порядка. Практическое использование таких уравнений состояния, например, в программном пакете ANSYS, требует однозначного определения их решения, определения производных по плотности и температуре, а также задания зависимостей для ряда других параметров (частные производные энтальпии по плотности и температуре; зависимость изобарической теплоемкости от температуры; функция, описывающая изменение энтропии; зависимость для скорости звука, зависимость для динамической вязкости от температуры). Сформированный набор функций был представлен в виде кода на языке программирования C++ для возможности внедрения в исходный код ANSYS. Был проведен сравнительный анализ исходя из которого были сделаны выводы о различии полученных результатов, а также была проведена оценка повторяемости полученных данных при использовании различных уравнений состояния.

Заключение. По результатам работы сформированы рекомендации к использованию уравнений состояния для моделирования разрядных процессов в АИПД. Также сформированы коды позволяющие проводить вычисления в соответствии с представленными рекомендациями в среде ANSYS fluent. Проведена оценка повторяемости результатов при использовании различных уравнений состояния.

Список источников

- [1] Федорова Д.К., Телех В.Д. Сравнительный анализ двигателей для наноспутников. *XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства: сб. тез.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021, т. 1, с. 261–264.
- [2] Shumeiko A.I., Telekh V.D., Mayorova V.I. Development of a novel wave plasma propulsion module with six-directional thrust vectoring capability. *Acta Astronautica*, 2022, vol. 191, pp. 431–437.
- [3] Shumeiko A.I., Telekh V.D. Direct thrust measurements of 2U-sized bi-directional wave plasma thruster. *AIP Advances*, 2023, vol. 13(8). <https://doi.org/10.1063/5.0160582>
- [4] Burton R.L., Turchi P.J. Pulsed Plasma Thruster. *Journal of Propulsion and Power*, 1998, vol. 14, no. 5, pp. 716–735. <https://doi.org/10.2514/2.5334>