

УДК 533.9.07

Физические процессы формирования плазменных струй дугового электротермического микродвигателя на аргоне

Горбунков Владимир Иванович^(*)

vigorbunkov@list.ru

Шалай Виктор Владимирович

shalay@omgtu.ru

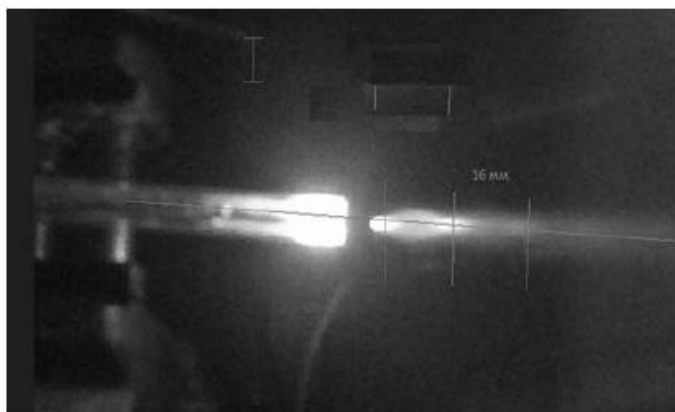
ОмГТУ, Омск, Россия

Аннотация. Показано, что состояние плазмы дугового электротермического микродвигателя (ЭТМД) на аргоне находится в режиме локального термического равновесия (ЛТР). На основании этого рассмотрены физические процессы формирования плазменной струи микродвигателя при истечении в вакуумную камеру и сделаны выводы, что система может иметь критерий динамического подобия для геометрически и кинематически подобных плазменных двигателей.

Ключевые слова: дуговой разряд плазмотронного типа, плазменные струи дугового разряда, электротермический микродвигатель, удельный импульс тяги, диски Маха

Введение. Особенности конструкции корректирующих электроплазменных микродвигателей для малых космических аппаратов не ограничились собственными колебаниями разрядной полости, частота которых определяется геометрическими размерами [1], они также включают относительно высокий уровень удельного импульса ЭТМД, уровень запасенной энергии плазменной струи, устойчивость и почти полное отсутствие расходимости.

Методы и материалы, результаты. На модели-демонстраторе ЭТМД при удельном расходе аргона $5 \cdot 10^{-2}$ г/с, рабочем давлении 10^5 Па, токе 3.2 А, напряжении питания 19.3 В с собственной частотой 6.25 кГц получен сверхзвуковой режим истечения плазменной струи с последовательностью группы скачков уплотнения (дисков Маха [2], см. рисунок) и рассмотрены физические процессы, ответственные за формирование плазменных струй.



Истечение плазменной струи аргонового ЭТМД
в вакуумную камеру давлением 400 Па

На основании сравнения параметров плазмы микродвигателя: равенствами электронной и газовой температуры, концентрации электронов и ионов, а также уровнем заселенности атомов аргона, удовлетворяющим больцмановскому закону распределения, доказано, что состояние плазмы ЭТМД находится в равновесном режиме [3]. Благодаря этому выхлопная плазменная струя является квазинейтральной (при радиусе Дебая $r_d \approx 0.1$ мкм), она характеризуется высоким уровнем запасенной энергии, резкими границами, большой дальностью (порядка 64 калибров капилляра), почти полным отсутствием расходимости.

В качестве примера продемонстрирована устойчивость плазменной струи при наличии высокой концентрации кластеров (частиц и паров металла). Благодаря свойству квазинейтральности плазмы, если кластеры имеют флуктуационно-избыточный заряд, то они вытесняются на периферию плазменной струи под действием электростатических сил, связанных с этим зарядом. Условия притяжения одноименно заряженных частиц, сохранение целостности в потоке газа при взаимодействии с препятствием, избирательным взаимодействием с проводником и диэлектриком основаны на наличии заряженных частиц в составе равновесной плазменной струи при ЛТР [4].

Заключение. Физические процессы формирования плазменных струй дугового электротермического микродвигателя на аргоне основаны на фундаментальных свойствах термически равновесной низкотемпературной плазмы. По количественному и качественному химическому составу плазмы, а также замкнутости системы поддержания существования плазмы [5], ЭТМД близок другим плазменным микродвигателям после выхода их в стационарный режим работы.

Список источников

- [1] Горбунков В.И., Колганов И.В., Косицын В.В., Шалай В.В. Импульсный характер дугового электротермического микродвигателя на аргоне. *XLIX 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, 2025, т. 1, с. 71–72.
- [2] Горбунков В.И. *Ударные волны в канале микродвигателя. Неравновесные процессы.* Москва, Торус пресс, 2024, 394 с.
- [3] Gorbunkov V.I. Bases for applying the LTE model to evaluate the state of plasma in an arcjet thruster. *17th International Conference Gas Discharge Plasmas and Their Applications GDP: Abstracts.* Ekaterinburg, IEP UB RAS, 2025, 275 p.
- [4] Горбунков В.И., Шалай В.В. Оценка равновесности модели электротермического микродвигателя. *4-я Всерос. конф. по аналитической спектроскопии с междунар. уч.: матер.* Краснодар, КубГУ, 2023, 242 с.
- [5] Артюхов Ю.А., Ключников В.Ю. Ракетные двигатели для малых космических аппаратов. *Космонавтика и ракетостроение*, 2021, т. 3, № 120, с. 143–159.