

УДК 621.455.6: 621.3.048.4

Разработка и испытание энергоанализатора для электрического ракетного двигателя по типу электроспрей

Малахов Владимир Евгеньевич^(*)

malakhov.ve@mipt.ru

Фанин Александр Александрович

fanin.aa@mipt.ru

Нигматзянов Владислав Вадимович

nigmatzyanov.vv@mipt.ru

МФТИ, Долгопрудный, Россия

Аннотация. Разработан прототип трехсеточного энергоанализатора для диагностики струи электрических ракетных двигателей по типу электроспрей (ЭРДЭ). Применена сферическая геометрия электродов. Сама конструкция зонда оптимизирована под поток с низкой плотностью тока (сотни мкА), содержащий крупные ионы при незначительной доле электронов. Рабочий диапазон напряжений на зонде от $-4,5$ до $4,5$ кВ. Геометрический размер зонда выбирался таким образом, чтобы полностью захватывать пучок диаметром $10-35$ мм, что соответствует размеру модуля ЭРДЭ. Юстировка зонда проводилась вручную при помощи системы компенсации перемещения и контролировалась визуально посредством микроскопа. Прозрачность ионно-оптической системы зонда, определялась расчетным и экспериментальными методами. Опробованные конструктивные решения, позволяют получать достоверные данные об энергетическом спектре ионов в условиях, критичных для традиционных плоскостных анализаторов. Полученные экспериментальные данные по энергии ионов струи ЭРДЭ находятся в хорошем соответствии с расчетными значениями.

Ключевые слова: трехсеточный энергоанализатор, зонд RPA, электрический ракетный двигатель, ЭРД, двигатель по типу электроспрей, диагностика пазмы, диагностика ионного пучка

Введение. Диагностика струи является необходимой для контроля и оптимизации технических характеристик электроракетных двигателей (ЭРД). Одним из ключевых параметров, определяющих эффективность и режим работы ЭРД, является распределение ионов по энергиям. Для его регистрации традиционно применяются трехсеточные зонды-энергоанализаторы или в западной литературе Retarding Potential Analyzer (RPA).

Принцип действия зонда основан на создании контролируемого электрического потенциала на анализирующей сетке, последовательно изменяемого во времени и тормозящего ионы с энергией меньшей чем определена анализирующей сеткой.

Классические конструктивные решения энергоанализатора предполагают использование плоской геометрии электродов [1]. Однако данный подход приводит к существенным погрешностям при измерениях в потоках с большими поперечными градиентами или при значительных размерах входного апертурного отверстия. Особенно это критично при диагностике ЭРД по типу электроспрей (ЭРДЭ) или коллоидных двигателей (КД).

В данной работе был разработан трехсеточный энергоанализатор для диагностики ЭРД по типу электроспрей поперечным размером последнего от 1,0 до 3,5 см.

Анализ конструкции показал, что классическая форма зонда с маленькой апертурой не подходит для данной задачи. Применение сферической геометрии электродов позволяет минимизировать систематические ошибки, обеспечивая более равномерное распределение электрического поля в зоне отбора частиц. Тем не менее, такая конструкция обладает рядом специфических особенностей, связанных как с технологическими ограничениями изготовления, так и с процедурами электрической калибровки и последующей интерпретации данных.

В работе использовались сферические сетки с радиусом кривизны 10,2–10,9 см, соответствующим углу расхождения потока, а размер отверстий в сетках был увеличен до 0,5 мм относительно классических десятков мкм, т. к. в составе струи ЭРД по типу электроспрей преобладают крупные анионы, катионы или заряженные капли рабочего тела. Расстояние между электродами выбрано 2 мм, исходя из того, что оно должно быть меньше радиуса Дебая, чтобы избежать экранирования и паразитных эффектов накопления заряда.

Материалом для сеток была выбрана сталь AISI-304, как доступный материал, обладающий низкой электронной эмиссией.

Корпус зонда был изготовлен из пластика PETG с помощью 3D-печати. Выбранный материал не является оптимальным в силу ряда причин: высокое газовыделение, низкая теплопроводность и низкая температура потери структурной прочности ($\sim 70^\circ\text{C}$). В рассматриваемом случае использование данного материала приемлемо, так как энергия анализируемого потока низкая, а общее время измерений короткое. Данное решение выбрано как базовое для подтверждения работоспособности прибора и целесообразности конструктивных решений.

Взаимное расположение электродов напрямую влияет на пределы и точность измерения прибором. Контроль соосности и качества тарировки сеток выполнялись визуальным контролем при помощи микроскопа Альтами. Юстировка соосности электродов проводилась вручную с помощью системы компенсации перемещения.

Ионно-оптическая система зонда в силу конструктивных особенностей имеет разную прозрачность по апертуре, что дополнительно учитывается при калибровке. Были проведены численные расчеты, а также прямое измерение прозрачности оптическим методом.

В первоначальной конструкции крепление сеточных электродов к силовому каркасу осуществлялось нейлоновыми винтами. Неточное позиционирование сеточных электродов приводило к попаданию проволоки в резьбовое отверстие. Из-за чего уменьшался межэлектродный зазор и снижалось пробойное напряжение до 1 кВ. В текущей версии измерения на пробой в вакууме показали выдерживание разницы потенциалов вплоть до 4,5 кВ.

Эксперименты проводился в вакуумной камере при давлении 10^{-7} торр на ЭРДЭ с характерными параметрами: удельный импульс 1600 с и тяга 0,02 мН.

Полученные экспериментальные данные находятся в хорошем соответствии с расчётными характеристиками диагностируемого ЭРД и показали эффективность выбранных конструктивных решений.

Полученные экспериментальные данные для диагностируемого ЭРД при отрицательной полярности демонстрируют сходство с результатами, представленными в исследовании [4], что свидетельствует о работе двигателя в ионном режиме. В то же время распределение данных при положительной полярности не имеет однозначной интерпретации. Вероятной причиной наблюдаемого размытия картины является присутствие в межэлектродном пространстве существенно замедленных капель и их последующее накопление. Для устранения неопределенности и получения статистически значимого результата требуется увеличение объема экспериментальных данных.

На следующем этапе планируется доработать корпуса зонда и провести более детальные и продолжительные измерения.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда НТИ
в рамках договора № 70-2025-000804 от 26.05.2025*

Список источников

- [1] Lemmer K.M., Wirz R.E., Sedwick R.J. Review of two retarding potential analyzers for use in high density helicon plasma. *30th International Electric Propulsion Conference*, Florence, Italy, 2007, pp. 1–10.
- [2] Lyne C.T., Liu M.F., Rovey J.L. A Brief Review of Electrospray Propulsion Diagnostics. *AIAA SCITECH 2023 Forum*, 2023. <https://doi.org/10.2514/6.2023-0263>
- [3] Miller C.E. *Characterization of Ion Cluster Fragmentation in Ionic Liquid Ion Sources*. PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2019.
- [4] Miller C.E., Lozano P.C. Measurement of the dissociation rates of ion clusters in ionic liquid ion sources. *Appl. Phys. Lett.*, 2020, vol. 116, no. 25.