

УДК 004.896

Анализ спектров излучения плазмы в абляционном импульсном плазменном двигателе на основе алгоритмов машинного обучения

Булавкина Анна Михайловна ^(*)	bam22ea106@student.bmstu.ru
Егошин Денис Андреевич	egoshinda@bmstu.ru
Пасынкова Дарья Сергеевна	pasynkova@bmstu.ru
Телех Виктор Дмитриевич	telekh@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Разработана модель полносвязной нейронной сети, предсказывающая по спектру излучения элементный состав плазмы с учетом степени ионизации компонент. Обучение модели проводилось на синтетических спектрах, построенных для различных ионизационных состояний элементов (C, H, O, N, Cl, F, Si, W). Сгенерированы два датасета по 100 000 спектров, различающиеся моделируемыми механизмами уширения линий. Полученные результаты подтверждают возможность применения методов искусственного интеллекта для автоматизации спектрального анализа, например спектров абляционного импульсного плазменного двигателя (АИПД).

Ключевые слова: абляционный импульсный плазменный двигатель (АИПД), спектральная диагностика, плазма, искусственный интеллект, машинное обучение

Введение. В последние годы наблюдается рост количества малых космических аппаратов (МКА), особенно формата CubeSat, для которых необходимы компактные двигательные установки, обеспечивающие стабильную работу при малой энергоемкости. Существует ряд электрических ракетных двигателей (ЭРД), которые могут обеспечивать ориентацию, коррекцию орбиты и межорбитальные перелеты МКА [1, 2]. Одним из перспективных вариантов такой двигательной установки является АИПД.

Принцип работы АИПД заключается в испарении твердого рабочего тела, частичной ионизации паров и их последующего ускорения под действием пондеромоторных сил и градиента газодинамического давления. Однако для таких двигателей характерна низкая эффективность, вызванная, в том числе рассогласованием максимумов магнитного давления и концентрации ионизованного вещества в канале ускорителя. Для оптимизации разрядных процессов с целью достижения наибольшей эффективности ускорения можно проводить экспериментальную отработку АИПД, в том числе с помощью методов спектральной диагностики. Это позволяет отслеживать согласованность максимумов концентрации ионизованных компонент с максимумами магнитного давления для АИПД.

Такая задача требует обработки значительного количества спектральных данных в различные моменты времени. Одним из подходов, обеспечивающих

необходимую скорость обработки таких данных, является искусственный интеллект (ИИ).

Методы и материалы; результаты. Для обучения моделей ИИ использовались модельные спектры, сгенерированные для различных ионизационных состояний элементов: С, Н, О, N, Cl, F, Cu, W. Для создания спектров из базы данных NIST [3] импортировали данные о статических весах и энергиях электронов на соседних уровнях и вероятностях перехода между уровнями, в диапазоне длин волн от 180 до 1140 нм.

Были сгенерированы два датасета содержащие по 100 000 спектров: первый моделировал спектры с доплеровским и естественным механизмами уширения линий, а второй с учетом доплеровского и инструментального уширений. При построении модельных спектров интенсивности рассчитывались на базе статических весов и температуры, которую оценочно принимали равной от 1 до 3 эВ. Для приближения синтетических спектров к реальным был введен учет фонового излучения. Степень ионизации компонент плазмы рассчитывалась по уравнению Саха.

Полученные массивы модельных спектров использовались для обучения ИИ, представляющего собой полносвязную архитектуру на основе TensorFlow, обеспечивающего многоклассовую классификацию состава плазмы по спектру излучения.

Заключение. Таким образом, была разработана модель ИИ, определяющая элементный состав плазмы с учетом степени ионизации ее компонент по спектральным данным.

*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] Egoshin D.A., Fedorova D.K., Pasyukova D.S., Pavlov A.V., Protasov Yu.Yu., Telekh V.D. Estimation of the Propellant Ablation Rate in a Pulse Discharge. *High Energy Chem.*, 2024, vol. 58, pp. S137–S141. <https://doi.org/10.1134/S0018143924700759>
- [2] Shumeiko A.I., Pashaev A.D., Savelev P.O., Telekh V.D. In-orbit demonstration of bi-directional electrodeless plasma thruster. *75th International Astronautical Congress*, 2024. <https://doi.org/10.52202/078371-0040>
- [3] *NIST Atomic Spectra Database*. URL: <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database> (accessed 08.11.2025).