

УДК 533.9.07

А. Н. ХАУСТОВА

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУИ СПД-70 МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ СО СКАНИРОВАНИЕМ ПЛАЗМЫ ЧЕРЕЗ КОЛЛИМАТОР

В статье представлены результаты очередного этапа работ над разработкой методики измерения эрозии внутренней и наружной керамических вставок по отдельности. Приведены результаты испытаний разработанного оптического приемника с коллиматором. Показан спектр СПД-70 в диапазоне 240-850 нм. Представлены результаты качественного анализа, на основании которых были сделаны выводы об элементе состава спектра излучения двигателя. В результате калибровки оптической чувствительности, до и после эксперимента, показано, что необходимо оснащение оптического приемника элементами защиты от запыления.

Ключевые слова: стационарный плазменный двигатель, спектр излучения, коллиматор

Введение

С конца XX стремительно увеличивается финансирование космических проектов, растет количество стран желающих занять свою нишу на рынке космической техники и технологий. За счет быстрых темпов развития современных технологий происходит все большее увеличение числа задач выполняемых космическими аппаратами (КА). В 2014 году произведено около 90 запусков КА различного назначения: теле- и радио-связь, навигация, метеорологические, дистанционное зондирование Земли, научно-исследовательские, военного назначения, навигационные [1]. В 2015 году за истекший период уже произведено 35 запусков и еще планируется не менее.

Перечень и сложность задач, выполняемых КА, расширяется с каждым годом. Это влечет за собой ужесточение требований, предъявляемых к КА, и к его подсистемам.

Современные перспективные космические задачи, как научно-исследовательского (полет на Марс, освоение глубокого космоса), так и коммерческого содержания, требуют все большего и большего ресурса двигательной установки (ДУ), выполняющей задачи перелетов, а также ориентации и стабилизации положения КА с высокой точностью [2].

Еще с 70-х годов XX века и до сегодняшнего времени наиболее перспективными исполнительными органами ДУ считаются электроракетные двигатели (ЭРД) [3]. Одним из ведущих классов ЭРД является стационарный плазменный двигатель (СПД).

Отличительной особенностью СПД является высокий удельный импульс, большой ресурс, что, в

свою очередь, предопределяет области применения СПД для КА с длительным временем активного существования.

Основным фактором, ограничивающим ресурс СПД, является износ керамических вставок газоразрядной камеры (ГРК). Существует несколько методов определения скорости эрозии ГРК, однако, наибольший интерес вызывают бесконтактные методы, а именно оптические методы, одним из которых является метод оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС), точность результатов которого не уступает прямым и зондовым методам измерений [4]. Критерии выбора метода ОЭС, именно для задач СПД, были более подробно рассмотрены в работе [5].

В экспериментах, проведенных в лаборатории ЭРД ХАИ, было показано, что наружная и внутренняя керамические вставки имеют различные скорости уноса материала. Для более подробного изучения данного вопроса был разработан метод оптической эмиссионной спектроскопии со сканированием плазмы через коллиматор (ОЭССК).

В данной работе представлены результаты предварительных испытаний метода с моделью двигателя СПД-70. Схема эксперимента представлена на рисунке 1 а.

1. Оборудование

Основа метода ОЭС заключается в том, что при помощи спектрометров производится измерение излучения двигателя, далее, на основании полученных результатов, производится расчет как параметров плазмы, так параметров эрозии деталей конструкции. На сегодняшний день на рынке измерительной аппаратуры появились малогабаритные спек-

тросметры высокого разрешения, которые широко применяются для решения данных задач. Управление работой спектрометра осуществляется при помощи компьютерного интерфейса.

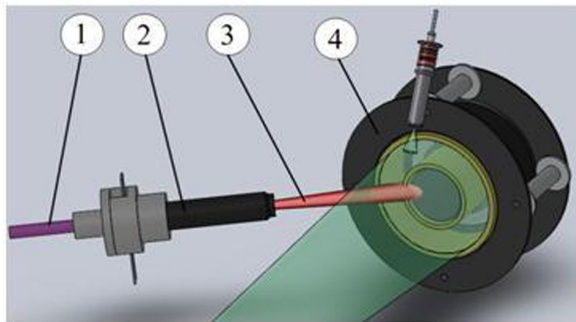


Рис. 1 а. Схема эксперимента:
1 – оптический кабель; 2 – коллиматор с кварцевым стеклом; 3 – объем приема излучения; 4 – СПД-70

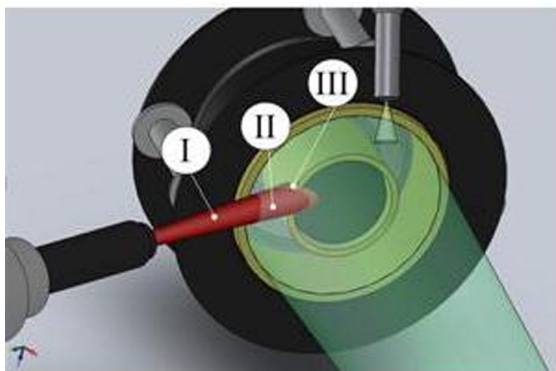


Рис. 1 б. Области приема излучения:
I – область магнитопровода; II – область струи;
III – объем приема излучения продуктов эрозии

Для проведения спектральных исследований, в лаборатории ЭРД ХАИ, на основании специфики спектра СПД, был разработан спектральный комплекс высокого разрешения, описание которого приводится в [6].

Излучение струи собирается оптическим приемником (см. рис. 1 а), который состоит из коллиматора 2, оснащенного защитным кварцевым стеклом, и оптического кабеля 1. Посредством коллиматора ограничивается угол расходимости оптического кабеля, и излучение собирается с узкой области 3.

Как показано на рисунке 1 б, в область обзора приемника было захвачено излучение из магнитопровода, керамических вставок и струи.

До и после эксперимента проводилась калибровка оптического приемника по справочному спектру ртути, для определения степени падения его чувствительности вследствие запыления.

Измерения проведены при следующих параметрах работы двигателя: напряжение разряда 300 В, ток 2 А, массовый расход 1,6 мг/с.

В данном эксперименте оптическая ось была направлена на внутреннюю керамическую вставку. Расстояние от среза двигателя до коллиматора составляло 60 мм.

2. Качественный анализ

На рисунках 2 а – г представлен измеренный спектр двигателя. Как видно по полученным результатам спектр является насыщенным большим количеством линий рабочего тела – газа ксенона. В диапазоне 240-850 нм находится 540 линий нейтрального (XeI) и 900 линий ионизированного ксенона (XeII). Это обуславливается большим количеством энергетических уровней элемента.

На рисунках 2 а, б показан ультрафиолетовый диапазон 240-300 нм. Зарегистрированы две линии эрозии керамических вставок – линии бора с длиной волны 249,66 нм; 249,77 нм. Данные линии пригодны для проведения количественного анализа, по ним производится контроль эрозии керамики во время работы двигателя. На рисунке 2 б показаны три линии железа. В данном случае это излучение продуктов эрозии магнитопровода или анода, попадающие в область обзора приемника.

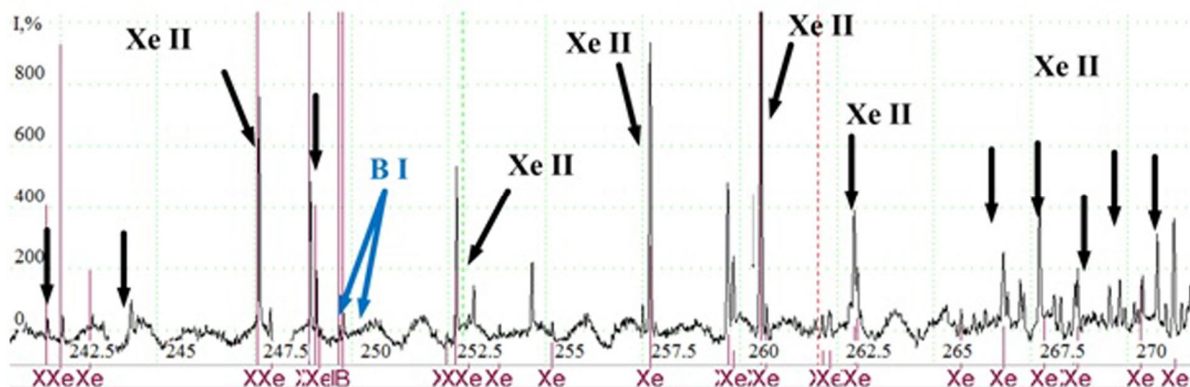
На рисунках 2 г, д показаны видимый и ближний инфракрасный диапазоны 600-850 нм. Зарегистрированы линии нейтрального ксенона, по которым производится расчет температуры и плотности электронов, так как для этих линий известны коэффициенты сечений возбуждения.

Как и в предшествующих экспериментах, автором работы, отмечено значительное падение интенсивностей линий ксенона во время эксперимента при неизменных разрядных параметрах и стабильном расходе рабочего тела. По окончании испытаний была произведена повторная калибровка оптического приемника, которая показала падение интенсивностей линий на 60 % в УФ диапазоне и на 30% в видимом и ИК диапазонах.

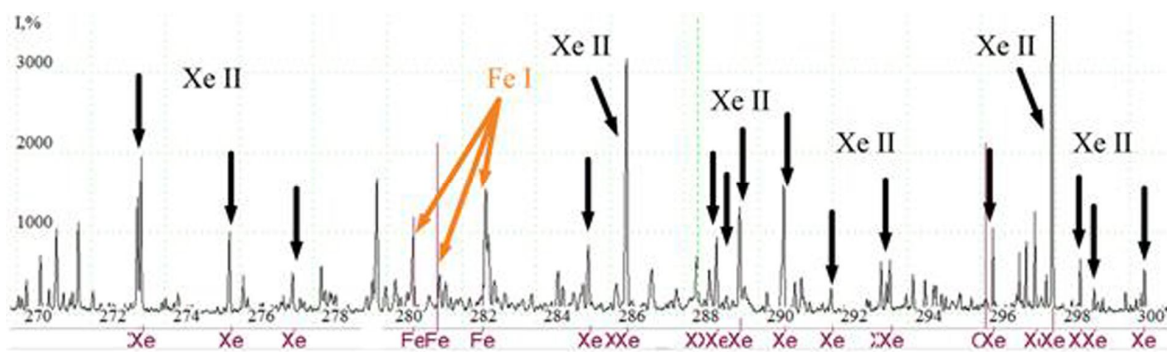
Выводы

В результате испытаний комплекса был измерен спектр двигателя СПД-70. Проведен качественный анализ элементного состава струи.

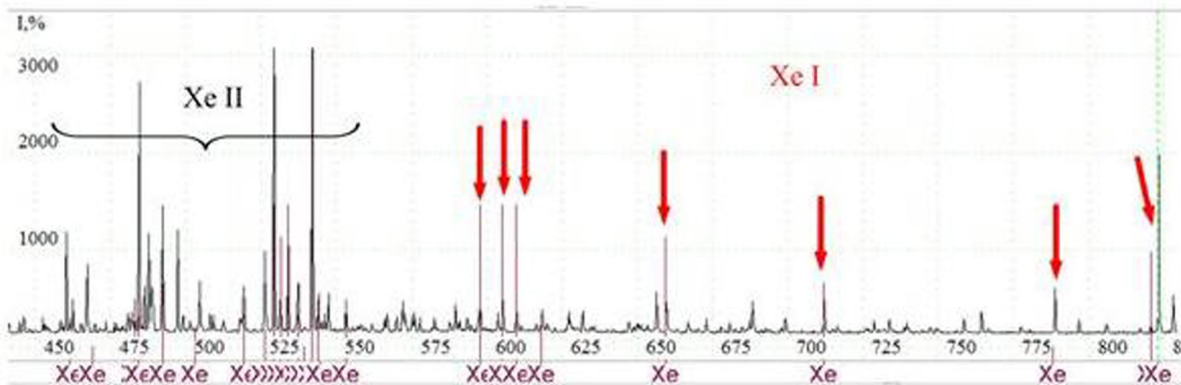
Зарегистрированы линии продуктов эрозии керамических вставок газоразрядной камеры и деталей конструкции двигателя. Несмотря на то, что относительная чувствительность обнаружения линий ксенона в УФ диапазоне очень низкая, из-за большой концентрации атомов в плазме, интенсивности линии высокие и не возникают затруднения при их регистрации.



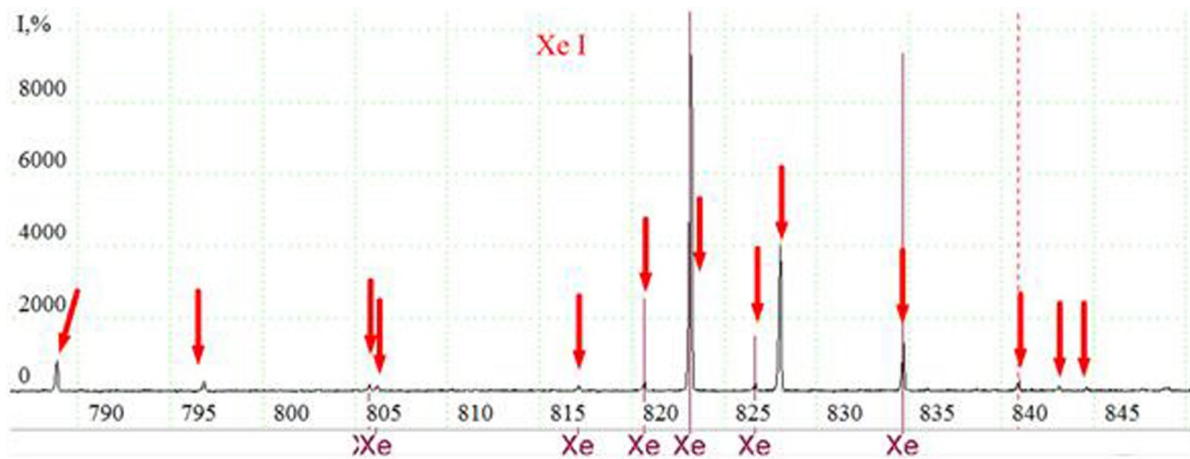
а



б



в



г

Рис. 2. Спектр излучения струи СПД-70 в диапазоне:
а – 240-270 нм; б – 270-300 нм; в – 450-825 нм; г – 780-850 нм

Отмечено запыление оптического приемника и падение его чувствительности, что значительно ограничивает время проведения эксперимента и невозможность получения количественных данных. С учетом этого, дальнейшие работы будут направлены на установку элементов защиты оптического приемника.

Литература

1. Список космических запусков в 2014 году [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://taggroup.com.ua/kosmicheskie-apparaty/zapuski-sputnikov/zapuski-sputnikov-v-2014-godu-2>. – 01.06.2015.

2. Ходненко, В. П. Электрореактивные двигательные установки в системах управления космических аппаратов дистанционного зондирования земли [Электронный ресурс] // В. П. Ходненко // Новости космонавтики. – 1996. – Режим доступа: <http://jurnal.vniim.ru/text/102/15.pdf>. – 01.06.2015.

3. Максименко, Т. А. Холловский двигатель малой мощности для систем коррекции орбиты

малых мини и микроспутников [Текст] / Т. А. Максименко, А. В. Лоян, Н. Н. Кошелев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 9(25). – С. 140-144.

4. Лоян, А. В. Экспериментальное исследование ресурсных характеристик МСПД [Текст] / А. В. Лоян, Т. А. Максименко, В. А. Подгорный // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 9(56). – С. 44-47.

5. Хаустова, А. Н. Разработка спектрального комплекса высокого разрешения для исследования спектра стационарного плазменного двигателя [Текст] / А. Н. Хаустова // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 9 (126). – С. 113-118.

6. Хаустова, А. Н. Разработка оптического приемника для измерения скорости эрозии отдельно наружной и внутренней керамических вставок ГРК СПД [Текст] / А. Н. Хаустова, А. В. Лоян, О. П. Рыбалов // Вестник двигателестроения. – 2015. – № 2. – в печати.

Поступила в редакцию 12.05.2014, рассмотрена на редколлегии 23.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф., декан физико-технического факультета А. Н. Петренко, Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара, Днепропетровск.

Благодарность

Автор выражает искреннюю благодарность за полезные дискуссии при подготовке статьи:

- Лояну Андрею Витальевичу – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. каф. 401, начальник отдела ЭРДУ МНТЦ КЭД Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»;

- Титову Максиму Юриевичу – аспиранту каф. 402 Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ».

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУЇ СПД-70 МЕТОДОМ ОПТИЧНОЇ ЄМИСІЙНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ СО СКУВАВАННЯМ СТРУЇ ЧЕРЕЗ КОЛІМАТОР

А. М. Хаустова

У статті представлені результати завершення наступного етапу робіт над розробкою методики вимірювання ерозії окремо внутрішньої та зовнішньої керамічних вставок. Приведені результати випробувань розробленого оптичного приймача з коліматором. Показаний спектр СПД-70 у діапазоні 240-850 нм. Представлені результати якісного аналізу на основі яких були зроблені висновки про елементний склад спектру випромінювання двигуна. У результаті калібрування оптичної чутливості, до і після експерименту, показано, що необхідно оснащення оптичного приймача елементами захисту від запилювання.

Ключові слова: стаціонарний плазмовий двигун, спектр випромінювання, коліматор.

INVESTIGATION OF SPT-70 PLUME BY MEANS OF OPTICAL EMISSION SPECTROSCOPY METHOD WITH THE SCANNING OF PLASMA THROUGH COLLIMATOR

A. N. Khaustova

Article presents the result of work on the development of the separately internal and external ceramics erosion measurement method. The tests results of the developed optical receiver are presented. Spectrum of SPT-70 with the wavelength range 240-850 nm is demonstrated. Qualitative analysis results are presented. A conclusion about spectrum element composition was made on the base on accepted spectrum data. In the result of optical sensitivity calibration before and after the experiment it was shown that optical receiver should be equipped with the protective elements.

Key words: stationary plasma thruster, emission spectrum, collimator.

Хаустова Алена Николаевна – аспирант каф. 402 Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: dissa.88@mail.ru.