

УДК 533.9.07

А. Н. ХАУСТОВА

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

РАЗРАБОТКА СПЕКТРАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРА СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В статье представлено описание спектрального комплекса высокого разрешения для исследования спектра стационарного плазменного двигателя. Показаны результаты анализа теоретического спектра двигателя, отмечены сложности при проведении качественного анализа. Представлена конструкция двигателя с защитной медной маской. Приведены параметры выбора технических характеристик спектрометров: исследуемые спектральные диапазоны и разрешающие способности приборов. Показана необходимость установки блока температурной стабилизации детектора. Приведена схема эксперимента метода оптической эмиссионной спектроскопии для измерения скорости эрозии конструкции двигателя и параметров струи.

Ключевые слова: спектрометр, эрозия, стационарный плазменный двигатель.

Введение

В лаборатории ЭРД ХАИ проводится полный цикл испытаний стационарных плазменных двигателей (СПД) типа СПД-20 М8 [1], СПД-70, геликоновых двигателей, различных моделей катодов [2] и т.д. Также проводятся исследовательские эксперименты, а именно: на этапе ресурсных испытаний двигателя СПД-20М8 были проведены исследования скорости эрозии керамических вставок различного состава ($\text{BN}+\text{SiO}_2$, АБН ($\text{BN}+\text{AlN}$) и $\text{BN}+\text{SiO}_2$ с различными присадками титана (Ti) и алюминия (Al), плотности и способа изготовления. Весь цикл экспериментов был разделен на четыре этапа, по окончании каждого из которых проведен контроль изменения массы и профиля керамических вставок, магнитопровода и сердечника. Несмотря на то, что прямые измерения дают наиболее наглядные и точные результаты, нет возможности контроля скорости эрозии во время эксперимента. По окончании каждого цикла эксперимента необходимо произвести разборку двигателя с извлечением керамических вставок для последующего взвешивания. При наличии разборной конструкции двигателя эта процедура не вызывает затруднений. Однако изготавливать отдельно разборную модель двигателя типа СПД-70 или СПД-100, для получения результатов по ресурсу, значительно увеличит стоимость двигательной установки в целом.

Следовательно, в данном случае, наиболее перспективным способом контроля скорости эрозии будут являться оптические методы. Один из косвенных методов измерения износа изолятора СПД является метод оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС).

Оптический метод имеет ряд преимуществ, по сравнению с другими методами диагностики, а именно: простота использования измерительной аппаратуры; стандартная процедура калибровки; малогабаритность оборудования; возможность подбора технических характеристик спектрометров в зависимости от специфики спектра изучаемого объекта и поставленной задачи [3].

Удобство применения метода ОЭС, именно для задач испытаний электроракетных двигателей (ЭРД), заключается в следующем: есть возможность мгновенной оценки характеристик плазмы и скорости эрозии, без прерывания работы двигателя [1, 4, 5]; отсутствие необходимости ввода дополнительных измерительных элементов в струю; простота методики расчета [6].

При сопоставлении данных, полученных методом ОЭС, прямыми и зондовыми методами, авторы работ [1] показывают, что разбег данных находится в пределах ошибки измерений.

В данных задачах используют спектрометры высокого разрешения научного класса. Технические характеристики спектрометра подбираются из следующих соображений:

– необходимо проведение регистрации в спектральном диапазоне с максимальной чувствительностью обнаружения линий элементов эрозии, атомарного и ионизированного ксенона.

– исходя из того, что массоунос материала происходит медленно [1], концентрация атомов продуктов эрозии будет на несколько порядков меньше концентрации атомов рабочего тела, следовательно, спектрометр должен быть оснащен детектором с высокой спектральной чувствительностью.

1. Спектр СПД

Для определения необходимых технических характеристик спектрометра, был проведен анализ элементного состава двигателя, который будет присутствовать в спектре, рис. 1.

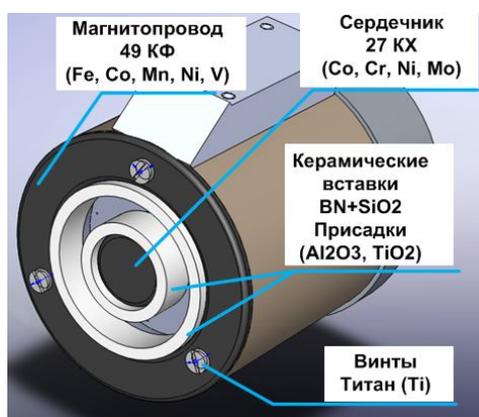


Рис. 1. Элементный состав двигателя СПД-20М8

Как показано на рисунке 1, химический состав деталей СПД очень широк. В спектре будут присутствовать 9 линий элементов эрозии внешней оболочки двигателя, 4 линии элементов эрозии керамики, а также будут регистрироваться линии газов остаточной атмосферы камеры, такие как азот (N) и кислород (O).

Для понимания необходимого спектрального диапазона был проведен следующий анализ: для каждого из присутствующих элементов были выбраны линии с максимальной чувствительностью обнаружения. Далее была произведена сортировка и выделены диапазоны с самым большим количеством интересующих линий, см. табл. 1.

Таблица 1

Линии элементов анализа эрозии керамики

Элемент	Длина волны, нм	Относительная чувствительность обнаружения	Характеристика линии
B	249,67	1000	AKG
	249,77	1000	AKG
Si	251,61	500	ACSKG
	288,16	1000	ACSKG
Al	266,04	10	AKG
Ti	295,61	1600	AKG

В четвертом столбце приведена классификация линий. Расшифровка буквенных обозначений следующая:

A – аналитическая линия;

C – калибровочная линия;

S – стандартная линия;

K – линия качественного анализа;

G – линия количественного анализа.

Как видно по табл. 1. в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне присутствуют наиболее чувствительные линии бора и кремния, пригодные для расчета скорости эрозии керамики. Также присутствует линия алюминия, но ее регистрация будет затруднительной.

В таблице 2 приведена характеристика элементов деталей конструкции. Спектры этих элементов отличаются наличием большого количества линий, следовательно, при необходимости можно проводить измерения как в УФ диапазоне, так и в других доступных диапазонах.

Таблица 2

Основные элементы анализа эрозии сердечника и магнетопровода

Элемент	Длина волны, нм	Относительная чувствительность обнаружения	Характеристика линии
Fe	296,69	1500	G
Mo	265,50	560	K
Co	288,64	190	K
Cr	273,19	280	AK
Ni	299,26	500	AK
Mn	279,48	6200	ACSKG
V	286,43	240	K

Для получения характеристик состояния плазмы, таких как температура и концентрация электронов, плотностей ионов и электронов, необходимы измерения линий ксенона в инфракрасном диапазоне (ИК). Наиболее характерные линии присутствуют в диапазоне от 780 нм до 980 нм.

Следовательно, для контроля массоуноса деталей СПД необходимы спектрометры с диапазоном измерений от 240 нм до 300 нм. Для исследования струи – спектрометры с диапазоном 780 нм - 980 нм.

2. Оборудование

Как было показано выше, химический состав деталей соприкасающихся с плазмой включает в себя 14 элементов. Соответственно в спектре будут регистрироваться все эти элементы. Для визуального анализа был смоделирован спектр описанной модели СПД. Как видно по рисунку 2 произвести качественный анализ данного спектра будет чрезвычайно затруднительно, а количественный анализ эрозии приведет к значительным ошибкам.

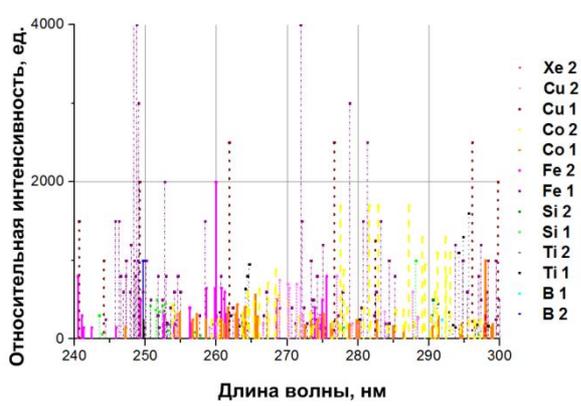


Рис. 2. Теоретический спектр СПД

В данном случае, для измерения профилей всех присутствующих линий, потребуется спектрометр с разрешающей способностью (РС) не хуже 0,0001 нм. Повышение разрешающей способности прибора осуществляется за счет уменьшения размеров входного оптического элемента (щели или кабеля), что значительно влияет на уровень выходного сигнала. Интенсивности линий элементов эрозии деталей конструкции очень слабые из-за низких скоростей испарения. В совокупности со слабым выходным сигналом спектрометра это может привести к сложностям при регистрации данных линий. В данном случае необходимо увеличение времени выдержки (ВВ), однако это сопровождается разогревом детектора и увеличением фонового сигнала [3].

Следовательно, для проведения более качественных измерений необходимо сузить элементный состав спектра, т.е. уменьшить количество регистрируемых элементов. Задача решена следующим образом: была спроектирована защитная маска, рис. 3. В данной модели двигателя эрозии будут подвергаться только керамические вставки, анод и сама маска. Концентрация элементов эрозии анода будет незначительной и линии данных элементов в спектре регистрироваться не будут. Материал маски выбирался таким образом, чтобы не было перекрытия или наложения с линиями элементов керамики.



Рис. 3. СПД-20М8 с медной маской

Для этого были смоделированы спектры двигателя с маской из титана (Ti), железа (Fe), молибдена (Mo) и меди (Cu). На рисунке 4 показан спектр СПД с медной маской. В УФ диапазоне находятся три наиболее чувствительные линии меди, нет перекрытия с линиями бора и кремния, и ксенона.

3. Выбор оптического разрешения приборов

Расчет необходимой разрешающей способности произведен следующим образом: как видно по рисунку 4, наиболее близко расположенными линиями являются линии бора. Разница между ними $\Delta\lambda_{BI}$ составляет 0,1 нм. Для разделения двух линий между их пиками должно находиться не менее четырех точек, следовательно, разрешающая способность прибора должна составлять 0,025 нм. Для получения данной разрешающей способности можно использовать щель размером 25 мкм, с дифракционной решеткой 3600 штр/мм [7]. Однако, с учетом низкой интенсивности линий эрозии, чувствительности прибора с щелью 25 мкм будет недостаточно. Таким образом, можно использовать щель размером 50 мкм с дифракционной решеткой 4200 штр/мм. Спектральный диапазон прибора будет составлять 30 нм.

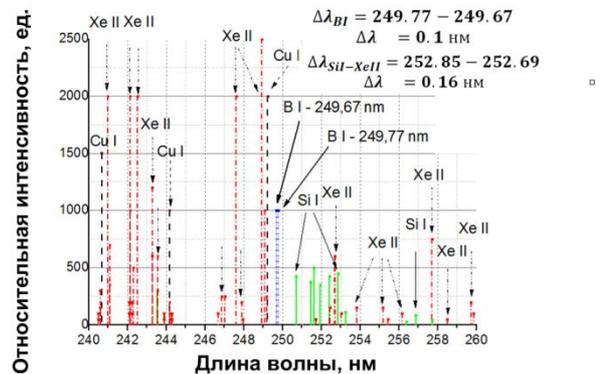


Рис. 4. Смоделированный спектр СПД с медной маской

Линии титана и кремния присутствуют в диапазоне свыше 270 нм, для этого диапазона был изготовлен спектрометр с такими же параметрами, как и для 240-270 нм.

В видимом диапазоне излучения присутствует большое количество линий атомарного и ионизированного ксенона, которые используются для определения относительной скорости эрозии. Их регистрация не вызывает затруднений, так как концентрация ксенона в струе на несколько порядков больше концентрации элементов эрозии. Для этого диапазона достаточно разрешение 0,22 нм.

Спектр излучения двигателя несет большое количество информации о состоянии плазмы: температура и концентрация электронов и ионов. Эти параметры определяются по отношению интенсивностей линий ксенона ближнего инфракрасного (ИК) 780 - 980 нм. В [8] параметры плазмы определялись по линиям, табл. 3.

Таблица 3
Линии ксенона в ИК диапазоне

Элемент	Длина волны, нм	Относительная чувствительность обнаружения
Xe I	788,7	300
	823,2	10000
	828,0	2000
	834,7	2000

Как видно по таблице 3, относительная чувствительность обнаружения линий ксенона в ИК диапазоне очень высокая. Разница по длине волны между ближайшими линиями составляет 5 нм. Следовательно, для этого диапазона будет достаточно спектрометра с параметрами: щель 50 мкм, дифракционная решетка 1800 штр/мм, спектральный диапазон 70 нм, разрешающая способность 0,07 нм.

Как уже отмечалось относительные чувствительности обнаружения линий в УФ диапазоне невысокие, и измерения будут проводиться с повышенным ВВ, это приводит к значительному разогреву детектора на протяжении уже первых 30 минут работы. На рисунке 5 показано, что при увеличении ВВ значительно изменяется отношение сигнал-шум.



Рис. 5. Зависимость изменения отношения сигнал-шум детектора от времени выдержки и температуры детектора

По результатам измерений профиля линии ртути 296,7 нм при различных температурах спектрометра получено, что необходимый уровень поддер-

жания температуры должен составлять $22 \pm 2^\circ\text{C}$, рис.6 [7].

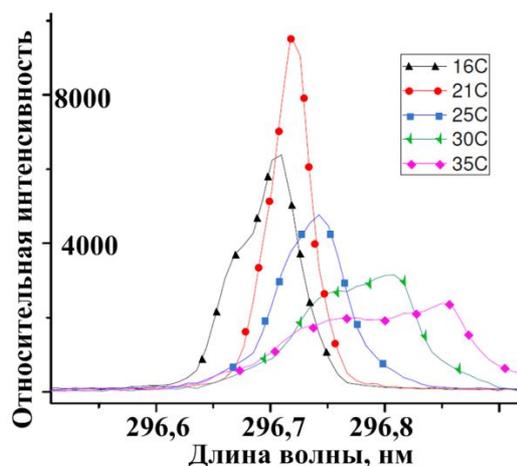


Рис. 6. Изменение профиля линии в зависимости от температуры спектрометра

В связи с этим, спектрометры УФ диапазона оснащены блоками температурной стабилизации детектора (БТСД), рис.7.



Рис. 7. Малогабаритный спектрометр высокого разрешения 240-250 нм с БТСД

При проведении испытаний спектрометров БТСД получено, что при работе спектрометра без охлаждения температура возрастает до 30°C при первых 30 минутах работы при ВВ более 10 с. При включенном БТСД температура находилась в пределах 22°C , уровень шума составил 4 %.

4. Схема эксперимента

Схема эксперимента со спектральным комплексом представлена на рисунке 8. Спектрометры подключены к компьютеру через usb-коннектор.

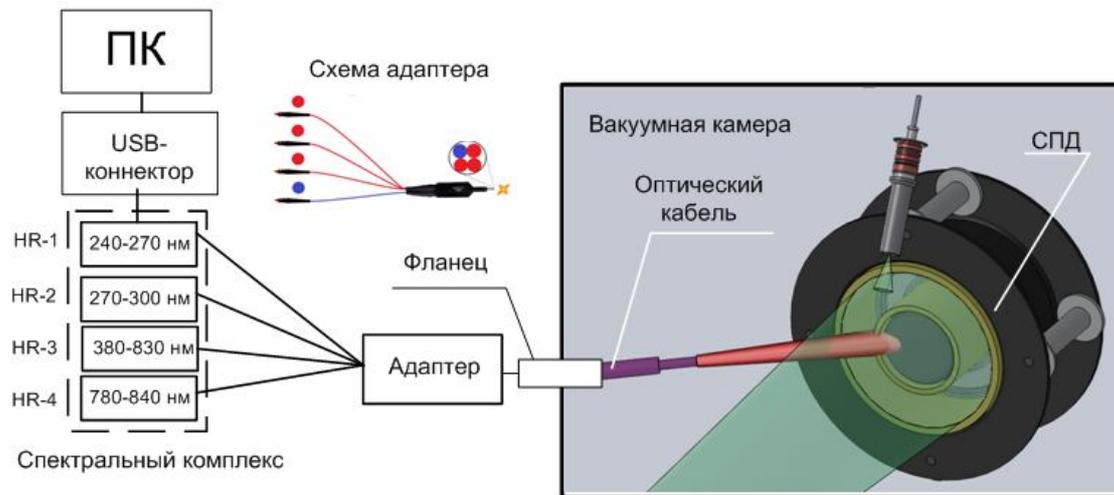


Рис. 8. Схема эксперимента

Оптические кабели от спектрометров через адаптер вводятся в камеру. Адаптер представляет собой переходник, соединяющий четыре кабеля в один.

Таким образом есть возможность производить измерения сразу со всего спектрального комплекса с одной области излучения.

Выводы

В результате анализа результатов испытаний СПД-20 М8 [1], результатов, опубликованных в литературе [4, 5, 8], изучения теоретического спектра двигателя, был разработан спектральный комплекс для контроля скорости эрозии ГРК СПД и исследования параметров струи двигателя.

Химический состав двигателя составляет 15 элементов. Регистрация линий всех элементов будет достаточно затруднительной задачей и может привести к ошибкам при проведении качественного анализа. Показано, что за счет установки медной маски, для защиты магнитопровода и сердечника от контакта с плазмой, можно сузить элементный состав спектра и упростить задачу. В качестве материала маски была выбрана медь, так как спектр меди не перекрывает спектры бора, кремния и ксенона.

Смоделирован теоретический спектр двигателя с маской. На основании его анализа приведены параметр выбора необходимого количества приборов, спектральные диапазоны и разрешающие способности спектрометров, которые в совокупности составили спектральный комплекс.

Комплекс состоит из четырех спектрометров: HR-1 и HR-2 с разрешающей способностью 0,025 нм для измерений в УФ диапазоне 240-300 нм, HR-3

с разрешающей способностью 0,22 нм для измерений в видимом диапазоне 380-830 нм и HR-4 с разрешающей способностью 0,07 нм для измерений в ИК диапазоне 780-850 нм.

Показано, что для УФ диапазона, при повышении температуры детектора происходит искажение профиля спектральной линии. Это может привести к значительным ошибкам при проведении как качественного, так и количественного анализа. Отмечено, что за счет установки блока температурной стабилизации детектора температура детектора поддерживается равной 22 °С.

Литература

1. Лоян, А. В. Экспериментальные исследования ресурсных характеристик МСПД [Текст] / А. А. Лоян, Т. А. Максименко, В. А. Подгорный // Двигатели и энергоустановки аэрокосмических летательных аппаратов : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2008. – С. 44-47.
2. Кошелев, Н. Н. Спектроскопические исследования интенсивности эрозии эмиттера в плазме слаботоочного полого катода [Текст] / Н. Н. Кошелев, А. П. Кислицин, В. А. Подгорный // Двигатели и энергоустановки аэрокосмических летательных аппаратов : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2007. – С. 126-128.
3. Техническое описание и руководство по эксплуатации [Текст]. – USA : Ocean Optics Inc, 2009. – 24 p.
4. Measurement and modeling of the inside channel deposition of the sputtered ceramics on HET PPSX000-ML. A tool to predict the erosion along the thruster lifetime [Text] / D. Pagnon, S. Pellerin, P. Lasgorceix [at all] // 30th International Electric Propulsion Conference. – Italy, 2007. – P. 1-10.
5. Спектроскопические исследования струи холловского двигателя с целью определения скоро-

сти эрозии ускорительного канала в ходе длительных ресурсных испытаний [Текст] / Н. В. Блинов, Ю. М. Головин, О. А. Горшков [и др.] // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 9(25). – С. 152-156.

6. Аналіз струменя плазмового двигуна, що буде встановлений на молодіжний супутник, за допомогою метода оптичної емісійної спектроскопії [Текст] : звіт НДР (заключ.) : М/100-2007 / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. С. Жуковського «ХАІ» ; кер. Лоян А. В. – Х., 2008. – 59 с.

7. *Aseq instruments. Техническое описание и руководство по эксплуатации [Текст]*. – Canada : Aseq instruments, 2005. – 12 p.

8. *Passive optical diagnostics of Xe-propelled Hall Thruster. I. Emission Cross Sections (Reprint) [Text]* / Y. Chiu, B. L. Austin, S. Williams // *Journal of applied physics*. – 2006. – Vol. 99 (11). – P. 113304-1–113304-11. – DOI: 10.1063/1.2195018.

Поступила в редакцию 12.05.2014, рассмотрена на редколлегии 22.06.2015.

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»;

- **Рыбалову Олегу Петровичу** – науч. сотр. каф. 402 Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ».

РОЗРОБКА СПЕКТРАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ ВИСОКОГО РОЗДІЛЕННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРУ СТАЦІОНАРНОГО ПЛАЗМОВОГО ДВИГУНА

А. М. Хаустова

У статті представлено опис спектрального комплексу високої роздільної здатності для дослідження спектру стаціонарного плазмового двигуна. Показано результати аналізу модельованого спектру двигуна, відмічено труднощі при проведенні якісного аналізу спектру. Представлено конструкцію двигуна з захисною мідною маскою. Приведено параметри вибору технічних характеристик спектрометрів: спектральних діапазонів та роздільної здатності пристроїв. Показано необхідність встановлення блоку температурної стабілізації детектора. Приведено схему експерименту методом оптичної емісійної спектроскопії для вимірювання швидкості ерозії конструкції двигуна та параметрів струменя.

Ключові слова: спектрометр, ерозія, стаціонарний плазмовий двигун.

DEVELOPMENT OF HIGH RESOLUTION SPECTRAL COMPLEX FOR THE STATIONARY PLASMA THRUSTER SPECTRUM RESEARCH

A. N. Khaustova

Article presents the description of high resolution spectral complex for the stationary plasma thruster spectrum research. Modeled thruster spectrum analysis is shown. Challenges of qualitative analysis are pointed. Construction of thruster with protective copper mask is presented. Spectrometer technical characteristics: researched spectral ranges and devices resolution of choice are pointed. The necessity of using spectrometer the temperature detector stabilizer is presented. Optical emission spectroscopy experimental scheme for the measurement of erosion rate and plume parameters is graphically designed.

Key words: spectrometer, erosion, stationary plasma thruster

Хаустова Алена Николаевна – аспирант каф. 402, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: khaustova@khai.edu.