

УДК 533.9.07

А. Н. ХАУСТОВА

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

КАЛИБРОВКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В статье представлен один из методов проведения калибровки спектрометра HR-2000 с применением гейслеровых трубок с тремя инертными газами. Описано оборудование для проведения калибровки спектрометров. Изложены особенности работы с гейслеровыми трубками и волоконно-оптическим спектрометром. Получены спектры излучения трех инертных газов: гелия, неона и криптона. Изложены результаты проведения калибровки, представлены результаты сравнения дрейфа шкалы длин волн до калибровки и после. Сделаны выводы об ошибке регистрации спектров данного прибора. Показано, что самостоятельное проведение калибровки требуется для повышения точности спектрального анализа.

Ключевые слова: спектрометр, калибровка, гейслерова трубка, спектр излучения.

Введение

С увеличением срока активного существования космических аппаратов возрастает необходимое время работы электроракетных двигателей, так, например, потребный ресурс наиболее востребованного стационарного плазменного двигателя (СПД) составляет 10 тысяч часов, диапазон энергопотребления 0,5–1,5 кВт. Прямые методы определения ресурса такого порядка, являются дорогостоящими и требуют значительных временных затрат, поэтому разработка эффективных методов прогнозирования ресурса является актуальным вопросом.

Одним из методов оценки мгновенной скорости эрозии двигателя является метод оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС). Результаты проведения экспериментов предложенным методом позволяют отслеживать эрозию элементов конструкции двигателя не прерывая его работу и не производя разборки двигателя. Учитывая тот факт, что метод ОЭС дает качественную и полуколичественную оценку эрозии, в лабораторных условиях его применение является наиболее оптимальным совместно с проведением непосредственных измерений эрозии деталей двигателя.

В ОЭС используются различного рода спектрометры высокого разрешения, предназначенные для данного типа задач. Аппаратура обычно поступает откалиброванной с коррекцией на параметры измеряемых спектров. Для калибровки фирмы используют стандартные образцы. К сожалению, со временем, под действием факторов окружающей среды наблюдается погрешности в работе спектро-

метра. Поэтому, если требования к точности анализа высокие, пользователи спектрометров самостоятельно перекалибровывают их.

При калибровке все спектры должны быть измерены на одном спектрометре. Уравнения коррекции различны даже для спектрометров одной и той же модели.

Кроме того, каждый спектральный диапазон имеет свои особенности [1].

Таким образом, сделан вывод о необходимости самостоятельного проведения калибровки спектрометра в измеряемом диапазоне для получения более точных характеристик работы используемого прибора.

1. Оборудование

В данном эксперименте используется спектрометр компании Ocean Optics HR-2000 рис. 1.



Рис. 1. Спектрометр HR-2000

Малогобаритный волоконно-оптический спектрометр HR-2000 с диапазоном по длине волны 380-830 нм, используется в задачах регистрации спектров абсорбции газов и линий атомной эмиссии. В основу работы спектрометра положен метод эмиссионного спектрального анализа, использующий зависимость интенсивности спектральных линий от содержания элементов в пробе.

Программное обеспечение спектрометра позволяет посредством ввода коэффициентов поправки по длине волны произвести калибровку [2]. Для этого необходимо измерять спектр элемента, не содержащего примесей, для более точной оценки измеренной длины волны и сравнивать ее со справочной.

Таким образом, проще всего использовать спектры инертных газов с процентным содержанием примесей не более 10 % [3]. Для таких целей применяют гейслеровы трубки. Их преимуществом является простота зажигания разряда и чистота газа (более 90%).

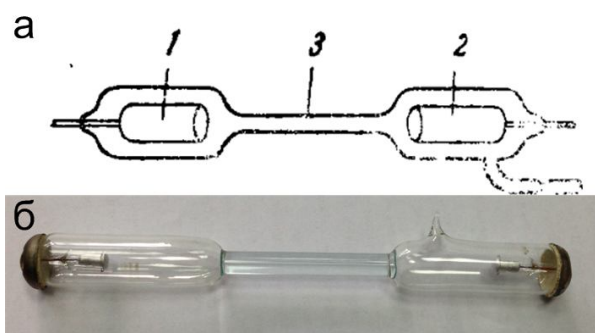


Рис. 2. Гейслерова трубка

На рис. 2 представлен простейший и наиболее распространенный тип гейслеровой трубки. Схема (а) и фотография (б), где 1 и 2 - полые цилиндрические электроды, выполняемые обычно из алюминия или никеля, 3 - капилляр диаметром в 2-3 мм. Благодаря малому сечению капилляра, плотность тока в нем оказывается большой, что обеспечивает достаточную яркость свечения. Сама трубка выполнена обычно из тугоплавких сортов стекла типа пирекс. Смесь заполняемого газа находится под давлением $\sim 10^{-5}$ мм. Питание трубки, как правило, осуществляется при помощи повышающих трансформаторов небольшой мощности, дающих во вторичной цепи напряжение порядка 10-12000 В, при силе тока 20-50 мА.

Однако в данном эксперименте более удобно поддерживать разряд в трубке путем подвода с генератора высокочастотной мощности на антенну (рис. 3), внутри которой, в стеклянной колбе, находилась трубка с газом.

Опволоконный кабель устанавливался на произвольном расстоянии от трубки, с условием того, чтоб интенсивность спектральных линий не превышала порог чувствительности прибора.

Далее в программе OObase 32 записывались данные измеряемого спектра.

По завершению эксперимента измеряется темновой спектр.

Обработка результатов производится при помощи программного пакета Atom.



Рис.3. Оборудование для проведения калибровки спектрометра

2. Результаты

Спектр трубки с гелием представлен на рис. 4. Время интегрирования - 1000 мс; осреднение - 1. На полученном спектре отслеживаются линии гелия в диапазоне длин волн 447,33 – 727,72 нм. При помощи программного обеспечения идентифицированы линии гелия.

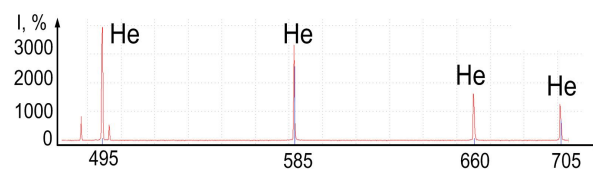


Рис. 4. Спектр гелия

Спектр трубки с гелием в измеряемом диапазоне не имеет небольшое количество линий, которые не накладываются друг на друга и их легко идентифицировать, что является удобным для проведения калибровки. Недостаток состоит в том, что полученный спектр не покрывает весь диапазон работы спектрометра, и нет возможности проверки точности регистрации на самых коротких и на самых длинных длинах волн спектрального диапазона прибора.

Исходя из выше сказанного, измерен спектр трубки с неонам (Ne), представленный на рис. 5, а также спектр трубки криптона (Kr) рис. 6.

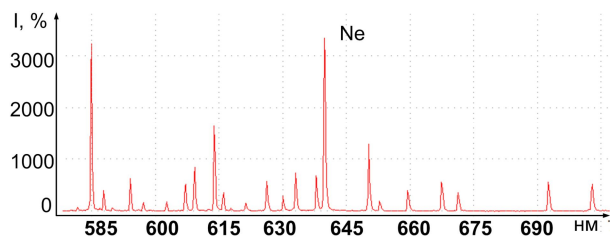


Рис. 5. Спектр неона

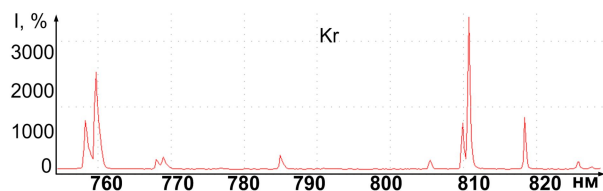


Рис. 6. Спектр криптона

Как известно, изменение интенсивности спектральной линии подчинено закону Гаусса [4], таким образом, проведена аппроксимация кривой Гаусса каждой видимой спектральной линии для трех измеренных спектров газов при помощи программного пакета Curve Expert Professional. Далее справочные длины волн сравнивались с расчетными-аппроксимированными и по разнице между ними выполнялись выводы о дрейфе шкалы длины волн.

Пример проведения аппроксимации одной из зарегистрированной линий гелия представлен на рис. 7.

По расположению максимума спектральной линии вычислялась расчетная длина волны и сравнивалась со справочным значением.

При проведении аппроксимации отслеживается стандартная ошибка и коэффициент корреляции, который не должен быть менее 0,99.

Если значение коэффициента менее указанного, спектрометр в данном диапазоне регистрировал более одной линии.

Таким же образом, производилась аппроксимация всех зарегистрированных линий.

На рисунке 9 представлена разница расчетной и справочной длин волн до проведения калибровки.

Как видно из рис. 8, дрейф шкалы длин волн превышает три пикселя, что в дальнейшем, при проведении эксперимента, приведет к ошибкам при идентификации элементного состава измеренного спектра электроракетного двигателя.

Как видно по рис. 9, максимальная разница расчетных длин волн и справочных составляет 0,2523 нм.

Качественным считается измерение, относительная ошибка которого не превышает 7% [5].

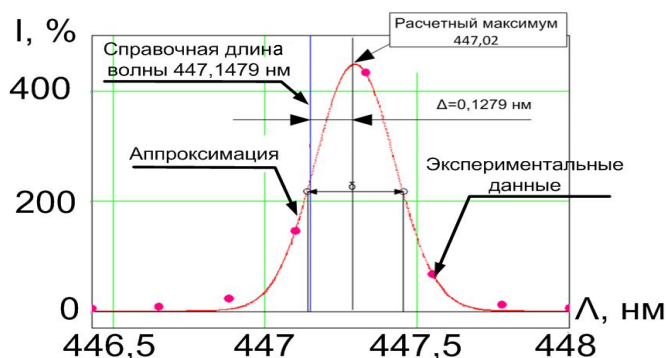
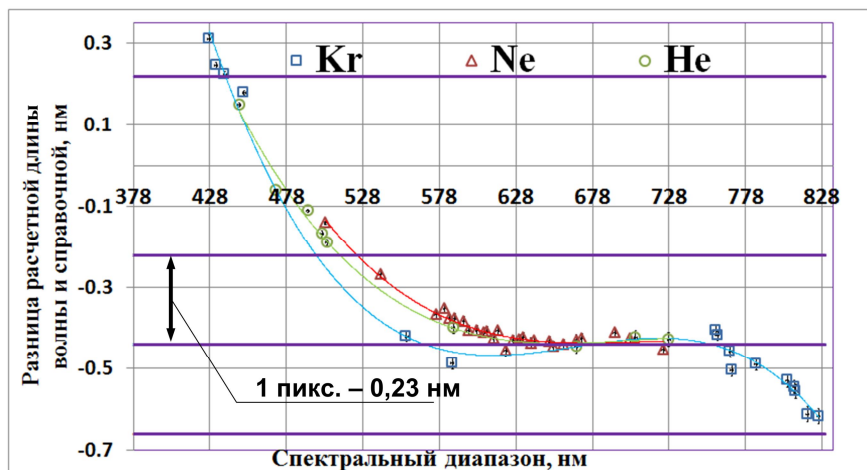
Рис. 7. Аппроксимация линии гелия 447,02 нм (δ – ширина линии)

Рис. 8. Разница расчетной длины волны и справочной до калибровки

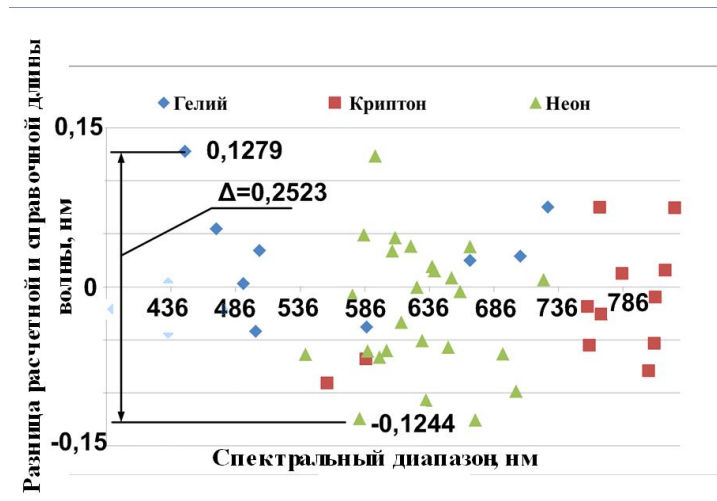


Рис. 9. Разница справочных длин волн и расчетных после калибровки

Заключение

Каждый спектрометр калибруется на предприятии-изготовителе, однако с течением времени, а также при изменении условий окружающей среды, такие как: изменение температуры, вибрации, повышенной влажности, возможен дрейф шкалы длин волн. Таким образом, требуется проводить периодическую калибровку.

Чувствительность прибора также зависит от ПЗС линейки, которая определяет точность проведения эксперимента, а, соответственно, точность анализа измеренного спектра. Ширина пикселя ПЗС линейки используемой в данном приборе составляет 0,23 нм.

По результатам проведенной калибровки получено максимальную разницу расчетной длины волны и справочной, равную 0,2523 нм.

Рассчитаны погрешности шкалы длин волн. Погрешность используемого прибора по самой короткой длине волны 380 нм составляет 0,029 %, по самой длинной 830 нм - 0,009 %.

Для повышения точности проведения эксперимента и качественного, также требуется проведение калибровки спектрометра по интенсивности.

Благодарность

Автор выразит искреннюю благодарность перечисленным сотрудникам за просмотр рукописи и многочисленные полезные советы, которые учтены при ее доработке:

- Лоян Андрей Витальевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. каф. 401, начальник отдела ЭРДУ МНТЦ КЭД, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»;
- Цаглов Александр Игоревич – аспирант каф. 401, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ».

Поступила в редакцию 12.05.2014, рассмотрена на редколлегии 16.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А. И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

Литература

1. Барсуков, В. И. *Начинающему аналитику-спектрометристу [Текст]* / В. И. Барсуков. – Тамбов : Издательско-полиграфический центр ТГТУ, 2006. – 109 с.
2. *Ocean Optics. Техническое описание и руководство по эксплуатации [Текст]*. – USA : Ocean Optics Inc, 2009. – 24 p.
3. Мандельштам, С. Л. *Введение в спектральный анализ [Текст]* / С. Л. Мандельштам ; под. ред. Г. С. Ландсберга. – М. : Гос. издательство технико-теоретической литературы, 1946. – 260 с.
4. Королев, Ю. М. *Итерационный метод разложения сложных дифракционных максимумов [Текст]* / Ю. М. Королев // *Материалы XI Всес. совещ. по рентгенографии минерального сырья*. – Свердловск : АН СССР, 1989. – Т. 1. – С. 41-51.
5. Ладыгин, В. А. *Об алгоритме аппроксимации экспериментальных данных суммой одномерных функций Гаусса [Текст]* / В. А. Ладыгин. – М. : Физический институт им. П. Н. Лебедева, 2011. – 12 с.

КАЛІБРУВАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО СПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ОПТИЧНОЇ ЕМІСІЙНОЇ СПЕКТРОСКОПІ ЕЛЕКТРОРАКЕТНИХ ДВИГУНІВ

А. М. Хаустова

У статті представлено один з методів проведення калібрування спектрометра HR-2000 із застосуванням гейслерової трубки з трьома інертними газами. Описано обладнання для калібрування спектрометрів. Описано особливості роботи з гейслеровими трубками та особливості роботи з волоконно-оптичним спектрометром. Отримано спектри випромінювання трьох інертних газів: гелію, неону і криптону. Викладено результати проведення калібрування. Представлено результати порівняння дрейфу шкали довжин хвиль до калібрування і після. Зроблено висновки про помилку реєстрації спектрів даного приладу. Показано, що самостійне проведення калібрування потрібне для підвищення точності спектрального аналізу.

Ключові слова: спектрометр, калібровка, гейслерова трубка, спектр випромінювання.

CALIBRATION OF FIBER-OPTIC SPECTROMETER FOR OPTICAL EMISSION SPECTROSCOPY METHOD OF ELECTRIC PROPULSION

A. N. Khaustova

The paper presents calibration method of the spectrometer HR-2000, with the usage of heusler tubes with three inert gases. Equipment for the spectrometer calibration is described. Work peculiarities with heusler tubes and fiber-optic spectrometer are described. Three emission spectra of helium, neon and krypton inert gases are obtained. Results of the calibration are presented. Results of the wavelength drift comparison of the scale before and after calibration are presented. Conclusions about instrument errors of the recording spectra are made. It has been shown that self-calibration is required to improve the accuracy of the spectral analysis.

Key words: spectrometer calibration, heusler tube, emission spectrum.

Хаустова Алена Николаевна – инженер каф. 401, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: alyona_khaustova@yahoo.com.ua.