

объяснить большим значением вкладываемой в разряд мощности при формировании разряда в воздухе и  $CF_4$ .

#### Литература

1. Shamoo K. Awsi, Effect of Nitrogen Gas Pressure and Hollow Cathode Geometry on the Luminous Intensity

Emitted from Glow Discharge Plasma, *American Journal of Modern Physics*. V. 2, No. 6, 2013, pp. 276-281.

2. Исследование особенностей возбуждения разряда с эффектом полого катода в  $N_2$  в трубчатом электроде / А.И. Божко, С.В. Бордусов, С.И. Мадвейко, М.С. Лушакова // Приборостроение – 2018: материалы 11-й МНТК, Минск, 14–16 ноября 2018 г. / БНТУ; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2018. – С. 247–248.

УДК 535.233.4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАМЕНИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ СПЕКТРОВ В ВИДИМОЙ ОБЛАСТИ

Бручковский И.И., Литвинович Г.С., Силук О.О., Бручковская С.И.

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета  
Минск, Республика Беларусь

Данная работа посвящена практическим аспектам исследования характеристик пламени, создаваемого в результате сгорания пиротехнической смеси на примере смеси неизвестного химического состава. Особое внимание уделяется определению энергетических характеристик пламени при помощи метода спектральной пирометрии. Интерес может представлять также интегральная энергетическая сила света в некотором диапазоне длин волн.

Пламя пиротехнической смеси в процессе горения является источником излучения благодаря суперпозиции трех основных процессов:

- Тепловое излучение продуктов горения
- Атомарное излучение
- Молекулярное излучение

Сущность метода восстановления энергетических характеристик пламени состоит в том, чтобы поставить в соответствие излучение черного тела, эквивалентного по своим спектрально-энергетическим свойствам исследуемому пламени. Для этого применялся метод спектральной пирометрии [1], который был дополнен методом определения коэффициента черноты.

На данном этапе влияние эмиссионных линий атомов и молекул не учитывается, пламя представляется в виде теплового излучения продуктов горения, которое может быть описано функцией Планка и соответствующим коэффициентом черноты.

Ниже дается краткое описание метода, позволяющего произвести одновременное восстановление температуры и коэффициента черноты исследуемого пламени. При этом важно отметить, что в термодинамическом смысле понятие температуры применять к пламени следует с осторожностью, ибо пламя не является хорошим примером равновесного состояния термодинамической системы.

Существует такое математическое преобразование координат  $(x, y)$ , в которых спектральное

распределение излучения абсолютно черного тела может быть представлено в виде прямой линии (1).

$$y = \ln C - x \cdot \frac{1}{T} \quad (1)$$

где  $x = \frac{c}{\lambda}$ ,  $y = \lambda^5 I$ . Здесь  $C = \frac{hc}{k} = 0,014381$  [К · м] – константа,  $I$  – спектральная плотность энергетической силы света зарегистрированного излучения [Вт/м·ср]. Преобразование  $(x, y)$  получило название «координаты Вина» [1], поэтому будем его применять далее по тексту. Таким образом, в координатах Вина любая функция Планка будет выглядеть как прямая линия с углом наклона обратно пропорциональным температуре. Смещение прямой вдоль оси  $y$  определяется значением коэффициента черноты.

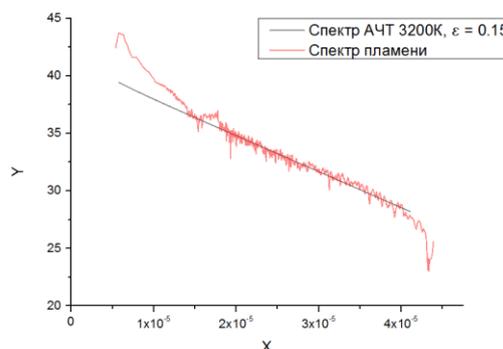


Рисунок 1 – Пример одновременного подбора коэффициента черноты  $\epsilon$  и температуры [К] для спектра пламени (красная линия) в координатах Вина

Однако, для использования вышеизложенного подхода, необходимо осуществлять переход от отсчетов АЦП данного конкретного спектрометра к величине  $I$  [Вт/м·ср]. На рисунке 2 представлена схема эксперимента, позволяющая проводить абсолютную калибровку спектрометра 1 по спектральной плотности энергетической силы света источника 4.

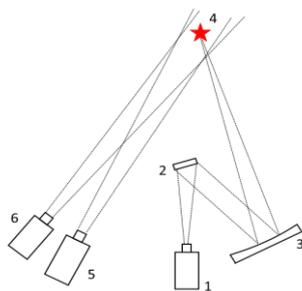


Рисунок 2 – Схема установки для регистрации спектральной плотности энергетической силы света излучателя 4:

1 – спектрометр видимого диапазона;  
2 – диффузная пластинка; 3 – сферическое зеркало

Особенностью схемы рисунка 2 является длиннофокусное сферическое зеркало 3 (фокусное расстояние 2 м), в фокальной плоскости которого находится исследуемый источник излучения. При смещении положения источника в пространстве на несколько сантиметров, происходит незначительное отклонение квазипараллельного пучка после зеркала 3. Диффузная пластинка 2 имеет индикатрису рассеяния близкую к ламбертовскому источнику, поэтому интенсивность излучения, регистрируемая спектрометром 1, практически не изменится при смещении источника 4.

Данное обстоятельство крайне важно учитывать при регистрации спектров пламени, так как по мере сгорания смеси может происходить изменение геометрических размеров светящейся области а также изменение положения пламени в пространстве. В таком случае, схема рисунка 2 позволяет удовлетворить условию полного заполнения апертуры спектрометра 1, что необходимо для проведения процедура калибровки по спектральной плотности энергетической силы света.

Стоит также отметить, что схема рисунка 2 имеет коэффициент пропускания около 0.01 и ее применение ограничивается яркостью исследуемого источника и чувствительностью спектрометра.

Для проведения калибровки спектрометра 1, использовалась ленточная лампа СИ8-200У с размерами ленты 2×8 мм, которая питалась током 19.00 А. Данная лампа, в свою очередь калибровалась по лампе ТРУ 1100-2350-0284 (размеры ленты 3×17 мм) с известной спектральной плотностью энергетической яркости (Сертификат калибровки RU 03 № 442 /18 от 20.06.2018).

На рисунке 3 представлена схема установки для переноса единицы спектральной плотности энергетической силы света с лампы ТРУ 1100-2350-0284 на лампу СИ8-200У.

При переносе единицы спектральной плотности энергетической силы света с одного источника на другой необходимо учитывать геометрические размеры источника, что и было сделано.

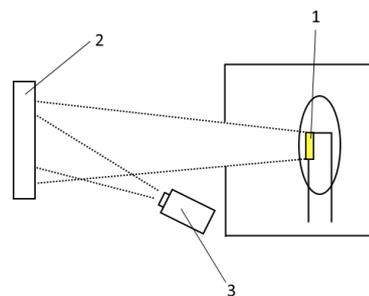


Рисунок 3 – Схема установки для переноса единицы спектральной плотности энергетической силы света с лампы ТРУ 1100-2350-0284 на лампу СИ8-200У:

1 – лента лампы; 2 – диффузный отражатель;  
3 – спектрометр ССП-600

При регистрации сигнала откалиброванной по схеме рисунка 3 лампы СИ8-200У спектрометром в схеме рисунка 2, можно получить коэффициенты пересчета значений сигналов АЦП в единицы спектральной плотности энергетической силы света [Вт/м·ср]. Полученные коэффициенты используются для пересчета сигналов зарегистрированных по схеме рисунка 2 спектров пламени.

Спектрометры 5 и 6 на рисунке 2 применяются для исследования спектра в ИК-области (наличие сильных эмиссионных линий), калибровка по ним не производится.

В том случае, когда исследуемое пламя содержит в себе много частиц продуктов сгорания, при попытке оценивания площади излучателя по видимому диапазону можно столкнуться со сложностью: рассеивающееся излучение создает эффект увеличения площади излучателя. При определении параметров пламени по вышеизложенной методике, с использованием спектрометра видимого диапазона, данное обстоятельство учитывать не нужно.



Рисунок 4 – Сравнение изображений пламени камерами видимого диапазона 0.4 – 0.8 мкм и ИК-диапазона 3 .. 5 мкм

Однако, если требуется проведение расчетов в ИК-области, то эффект рассеяния в видимом диапазоне может привести к завышению рассчитываемых значений спектральной плотности энергетической силы света в 15 – 30 раз. На рисунке 4 представлено изображение пламени двумя камерами в различных спектральных диапазонах.

В видимой области спектр пламени визуально может сильно отличаться от спектра излучения АЧТ благодаря наличию мощных эмиссионных

линий. Однако, применяя метод спектральной пирометрии [1] удалось определить параметры черного тела, эквивалентного по своим спектрально-энергетическим свойствам пламени исследуемого зажигательного элемента.

#### Литература

1. А.Н. Магунов Измерение температуры объектов с неизвестной излучательной способностью методом спектральной пирометрии // Научное приборостроение, 2010. – Том 20. – № 3. – С. 22–26

535.24

### КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ СПЕКТРОРАДИОМЕТРИЧЕСКИХ И РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Гуревич В.Л.<sup>1</sup>, Кривonos П.В.<sup>1</sup>, Скумс Д.В.<sup>1</sup>, Длугунович В.А.<sup>2</sup>, Никоненко С.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Республиканское унитарное предприятие «Белорусский государственный институт метрологии»  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Государственное научное учреждение «Институт физики НАН Беларуси»  
Минск, Республика Беларусь

Радиометрические и спектрометрические характеристики твердых, жидких и газообразных сред и испускаемого ими оптического излучения в значительной мере содержат наиболее полезную информацию о свойствах природных и искусственных образований. Различная оптоэлектронная техника, которая применяется в оптических методах неразрушающего контроля и диагностики в промышленности, сельском хозяйстве, медицине и санитарии, охране окружающей среды, контроле безопасных условий труда и др., необходима для получения информации об измеряемых радиометрических и спектрометрических величинах. В Беларуси широко используется, разрабатывается, и выпускается различная оптоэлектронная техника, работающая в спектральном диапазоне от 0,2 до 25,0 мкм, поэтому создание и развитие ее метрологического обеспечения, прогнозирование ее ресурса, повышение уровня точности и достоверности измерений параметров и характеристик оптического излучения является важной государственной задачей. Решение этой задачи будет способствовать удовлетворению потребностей субъектов различных форм собственности в метрологическом контроле радиометрической и спектрометрической техники, в том числе и специального назначения, улучшению качества выпускаемой и используемой отечественной продукции, и повышению ее конкурентоспособности на внутреннем и внешнем рынках.

Базовыми элементами системы обеспечения единства измерений (СОЕИ) в любой области измерений являются: эталоны соответствующих физических величин; рабочие эталоны, обеспечивающие передачу размера этих величин средствами измерений (СИ); технические нормативные правовые акты и методическая документация; аккредитованные калибровочные, поверочные и испытательные лаборатории.

В 2019 г. в рамках подпрограммы «Эталонная Беларусь» ГНТП «Эталонная и научная аппаратура»

на 2016 – 2020 гг. создан Национальный эталон единиц спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ), спектральной плотности энергетической освещенности (СПЭО) и силы излучения в диапазоне длин волн от 0,2 до 3,0 мкм. Эталон является первичным. Функционально он состоит из трех основных систем: комплекса СИ для воспроизведения единиц (КСИВЕ) СПЭЯ излучения и создаваемой СПЭО, основой которого является модель высокотемпературного черного тела (МВЧТ) ВВ3500М производства ВНИИОФИ (Россия); системы для измерений СПЭО и СПЭЯ в ультрафиолетовой (УФ) области спектра (УФ-система), системы для калибровки широкоапертурных СИ. Воспроизведение единицы СПЭЯ на эталоне осуществляется с помощью МВЧТ ВВ3500М. Следует отметить, что подобные МВЧТ используются в составе эталонов ведущих национальных метрологических институтов (НМИ) мира NIST (США), PTB (Германия), NPL (Великобритания), а также ряда других стран (Китай, Южная Корея, Малайзия и др.). Прецизионные измерения температуры полости МВЧТ выполняют эталонным линейным пирометром LP5, который также используется в составе эталонов ведущих НМИ. Посредством спектральных систем КСИВЕ (0,35 – 3,00 мкм) и УФ-системы (0,20 – 0,90 мкм) значения СПЭЯ и СПЭО передают комплектам эталонных ламп, которые выполняют функцию вторичных эталонов и хранят соответствующие шкалы СПЭЯ и СПЭО. УФ-система эталона позволяет проводить измерения спектрометрических характеристик и силы излучения не только ламповых, но и других типов излучателей, например, светодиодов, при этом можно измерить пространственное распределение их силы излучения. С помощью системы для калибровки широкоапертурных СИ осуществляется калибровка спектрометров.

Основные метрологические характеристики эталона в спектральном диапазоне от 0,2 до 3,0 мкм следующие: воспроизведение единицы