

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-3-36-40>

МЕТОДИКИ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ ИНТЕНСИВНОСТИ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ СПЕКТРОФОТОМЕТРА СФ-56

© Лев Геннадьевич Скорняков*, Андрей Вячеславович Дёмин,
Ольга Владимировна Денисова

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия;
e-mail: sko111lev@gmail.com

*Статья поступила 6 июля 2018 г. Поступила после доработки 21 января 2019 г.
Принята к публикации 23 января 2019 г.*

Приведены экспериментальные результаты тестирования работы спектрофотометра СФ-56. Предложены методики обработки данных измерения интенсивности источников излучения с помощью программ Maxima и Gnuplot. Установлено, что применение гауссовой функции для аппроксимации кривой излучения газовых ламп низкого давления в случае номинальной ширины щели прибора 0,3 нм повышает точность определения длины волны максимума линий излучения по сравнению с паспортными данными в 2,5 раза. Вместе с тем эффективная ширина щели, определенная как полуширина реперной линии 486,0 (или 656,1) нм, всегда превышает паспортные значения в среднем на 15 – 20 %, а в случае номинальной щели 1 нм — в 1,5 раза. Длина волны максимума реперной линии СФ-56 (в течение времени измерений до 6000 с) линейно зависит от времени. Интенсивность реперной линии со временем прогрева прибора меняется нелинейно и хорошо аппроксимируется формулой для осциллятора с декрементом затухания, равным его собственной частоте. Получено аналитическое выражение для спектра коэффициента излучения вольфрама в интервале длин волн 300 – 1100 нм. Планковская кривая для испускательной способности вольфрама описывает спектр сигнала штатной лампы накаливания СФ-56 только в интервале 300 – 420 нм. Также определена спектральная функция прибора. Отмечено, что с помощью СФ-56 можно измерять спектры источников излучения, размещаемых в осветительном блоке. Представленные данные могут быть использованы как для совершенствования данного типа приборов, так и для повышения точности и достоверности результатов измерения.

Ключевые слова: спектр; дейтерий; спектрофотометр; аппроксимация; временной дрейф; коэффициент излучения; спектральная функция.

APPROXIMATION METHODS USED FOR PROCESSING MEASUREMENTS OF THE INTENSITY SPECTRA OF RADIATION SOURCES OF SF-56 SPECTROPHOTOMETERS

© Lev G. Skorniyakov*, Andrei V. Dyomin, Olga V. Denisova

Yeltsin University, Ekaterinburg, Russia; e-mail: *sko111lev@gmail.com

Received July 6, 2018. Revised January 21, 2019. Accepted January 23, 2019.

The experimental results of testing the operation features of a SF-56 spectrophotometer are presented. Methods for processing the results of measuring the intensity of radiation sources using Maxima and Gnuplot software packages are developed to increase the accuracy of measurements. The use of the Gaussian function in approximation of the emission curve of low-pressure gas lamps for a nominal slit width of 0.3 nm increases the accuracy of determination of the wavelength of the maximum of emission lines by 2.5 times compared to the passport data. However, the effective width of the slit defined as the half-width of the reference line 486 nm (or 656.1 nm) always exceeds the passport values by 15 – 20%, and for a nominal slit of 1 nm by a factor of 1.5. The wavelength of the maximum of the SF-56 reference line (during the measurement time up to 6000 sec) linearly depends on time. The dependence of the reference line intensity on the heating time turned out to be nonlinear and is well approximated by the formula for an oscillator with a damping factor equal to the natural frequency. An analytical expression for the spectrum of the tungsten emission coefficient in the wavelength range of 300 – 1100 nm was derived. The Planck curve for the tungsten emissivity describes the spectrum of the signal of a standard incandescent lamp only in the wavelength range of 300 – 420 nm. The spectral function of the instrument is also determined. It is noted that SF-56 spectrophotometers can be used to measure the spectra of radiation sources

placed in the lighting unit. The presented data can be used both to improve this type of devices, and to improve the accuracy and reliability of measurement results.

Keywords: spectrum; deuterium; spectrophotometer; approximation; time drift; emissivity; spectral function.

Спектрофотометр СФ-56 предназначен для измерения спектральных коэффициентов направленного пропускания жидких и твердых прозрачных веществ в области спектра 190 – 1100 нм [1]. Прибор применяют при контроле качества как готовой продукции, так и технологических процессов во многих отраслях промышленности.

Цель работы — использование метода аппроксимации спектральных и временных характеристик СФ-56 для повышения точности результатов измерений.

Тестировали спектрофотометры СФ-56 (номера 006 и 007) со штатными источниками излучения (дейтериевой и галогенной лампами).

Линейная, гауссова и дифракционная аппроксимации

При относительно низких температурах и давлениях ширина спектральных линий дейтерия намного меньше минимальной заявленной ширины щели d СФ-56. При этом измеренные спектры интенсивности спектральных линий дают аппаратную функцию прибора при табличной длине волны [2, 3].

На рис. 1 показаны приведенные к одному масштабу спектры интенсивности I реперной линии 656,1 нм. Видно, что регистрируемые спектры симметричны. Для ширины щели 0,3 нм в районе максимума линии излучения гауссова и

дифракционная функции [4] хорошо описывают экспериментальные результаты. Лучшее согласие наблюдается у гауссовой зависимости, поскольку в этом случае отсутствуют побочные дифракционные экстремумы. Для 1,0 нм форма спектральной линии удовлетворительно аппроксимируется линейной функцией.

Зависимость сигнала от номинальной ширины щели

В областях спектра со слабой зависимостью интенсивности излучения источника от длины волны следует ожидать, что регистрируемый сигнал будет квадратично зависеть от ширины щели d .

На рис. 2 приведены данные для интенсивности сигнала в ультрафиолетовой области спектра вдали от дискретных линий дейтерия. Видно, что для исследуемых приборов квадратный корень из величины сигнала линейно меняется с ростом номинальной ширины щели вне зависимости от величины сигнала и соотношения сигнал/шум.

Вместе с тем для $d = 1$ нм сигнал примерно на 30 % превышал значение, которое должно строго соответствовать зависимости.

Сравнение номинальных ширин щелей СФ-56 с полуширинами α - (656,106 нм) и β -линий (485,999 нм) [5] излучения дейтерия, полученных после вычитания фона (см. таблицу), показало, что измеренные полуширины для обеих линий превышают номинальные значения ширин щели. Конечно, наблюдаемая полуширина и номинальное значение не обязаны совпадать, од-

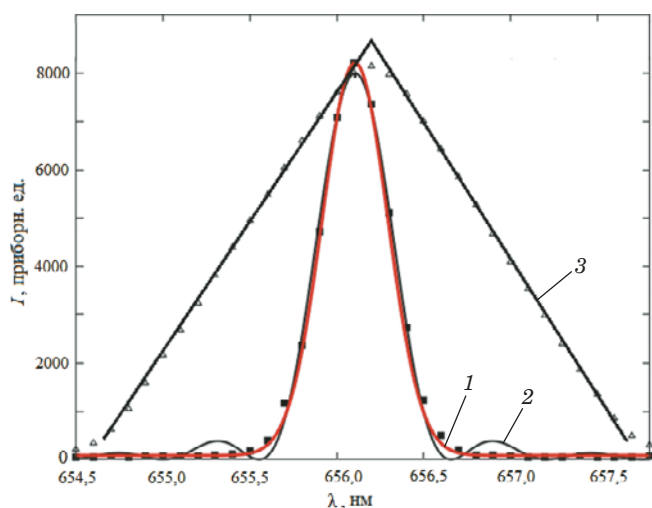


Рис. 1. Спектры интенсивности I линии 656,1 нм, измеренные при номинальных щелях СФ-56 0,3 (■) и 1,0 нм (△) (1 и 2 — аппроксимации гауссовой и дифракционной функциями, 3 — линейная аппроксимация)

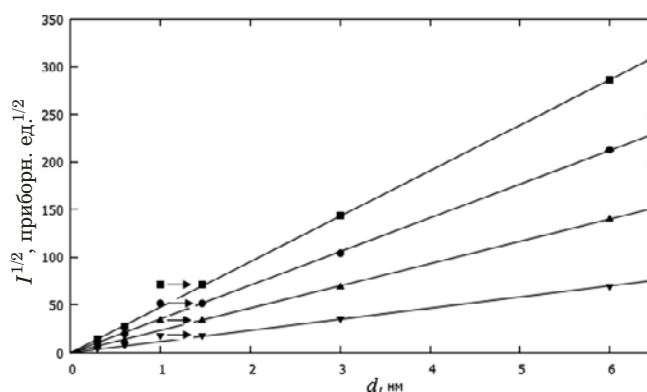


Рис. 2. Зависимости величины сигнала $I^{1/2}$ от номинальной ширины щели d для приборов 006 (■, ●, ▼; $\lambda = 415, 355, 200$ нм) и 007 (▲; $\lambda = 220$ нм)

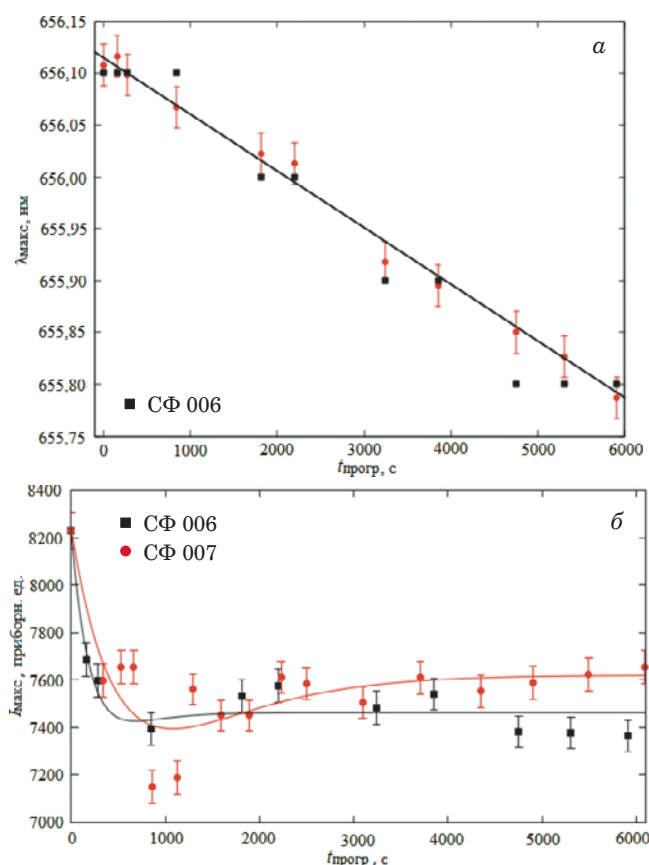


Рис. 3. Зависимости λ_{max} (● — максимум аппроксимирующих гауссовых кривых с указанием погрешности (программа Gnuplot); прямая — аппроксимация зависимости положения максимума спектральной линии от времени прогрева) (а) и I_{max} (б) от времени прогрева $t_{\text{прогр}}$

нако естественно ожидать, что отклонение должно быть в процентном отношении одинаковым для всех d . Получили, что оно составляет 10 – 20 % (усредненное по восьми результатам — 1,18), исключая $d = 1,0$ нм (1,73).

Таким образом, для сравнения сигналов при разных d необходимо умножить номинальную ширину щели на 1,18, а в случае $d = 1,0$ нм — на 1,73, либо умножить только последнее на $1,73/1,18 = 1,47$, оставив остальные без измене-

Результаты измерения полуширин спектральных линий излучения дейтерия

Номинальная ширина щели, нм	α		β	
	Измеренная ширина щели, нм	Отношение измеренной ширины щели к номинальной	Измеренная ширина щели, нм	Отношение измеренной ширины щели к номинальной
0,3	0,45	1,50	0,36	1,20
0,6	0,69	1,17	0,65	1,08
1,0	1,60	1,60	1,85	1,85
3,0	3,20	1,07	3,55	1,17
6,0	6,55	1,09	7,10	1,18

ния (см. рис. 2, где стрелками показан результат перенормировки).

Временной дрейф параметров

Оказалось, что со временем меняются как регистрируемое положение максимума реперной линии λ_{max} , так и ее интенсивность I_{max} .

На рис. 3 приведена зависимость λ_{max} от времени прогрева для прибора 006 (качественно аналогичная картина наблюдалась и для 007). Ступенчатость графика, построенного по показаниям спектрофотометра, связана с недостаточной точностью определения длины волны при использовании штатного ПО. Поскольку сдвиг калибровочной линии — непрерывная функция времени, следует признать, что аппроксимация спектральной линии гауссовым контуром ближе соответствует действительности и позволяет получить положение максимума спектральной линии с большей, чем указано в паспортных данных прибора, точностью.

Скорости дрейфа λ_{max} составили $0,57 \cdot 10^{-4}$ (для 006) и $0,46 \cdot 10^{-4}$ нм/с (для 007), оставаясь неизменными в интервале времени прогрева 0 – 6000 с. Это указывает на то, что дрейф положения максимума реперной линии длится как минимум 1 ч 40 мин. Поэтому операцию калибровки следует проводить непосредственно перед каждым измерением.

Полуширина реперной линии тестируемых СФ не менялась со временем прогрева и по измерениям полуширины аппроксимирующей кривой составляла $0,46 \pm 0,02$ и $0,44 \pm 0,02$ нм (для приборов 006 и 007 соответственно). Поскольку отклонения результатов измерения от среднего значения с запасом укладываются в точность определения положения λ_{max} , зависимость полуширины линии от каких-либо параметров не исследовали.

Аппроксимация экспериментальных данных (программа Gnuplot) зависимостью, характерной для сильно затухающих осцилляторов [6] (когда декремент затухания равен собственной частоте), позволила только в общих чертах описать полученные на опыте результаты и определить декремент затухания $\lambda = (1,5 - 2,0) \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Кривые интенсивности реперной линии I_{max} для обоих приборов сначала резко падают при $t_{\text{прогр}}$ до 15 мин, затем, пройдя через минимум, меняются слабо. Отношение изменения интенсивности к ее максимальному значению составило 10 и 13 % (для приборов 006 и 007 соответственно).

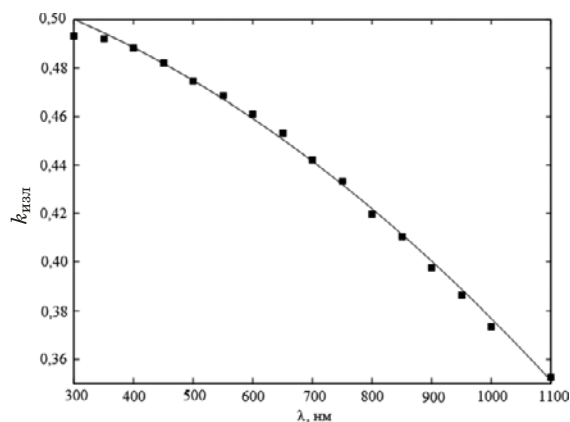


Рис. 4. Аппроксимация «рекомендованных» усредненных литературных данных для спектральной зависимости коэффициента излучения вольфрама $k_{\text{изл}}$ (■) квадратичной функцией $f_{\text{ки}}(\lambda)$ (сплошная кривая)

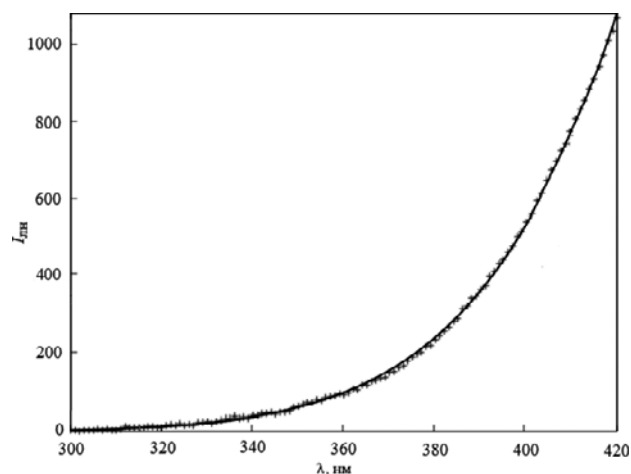


Рис. 5. Экспериментальный спектр интенсивности лампы накаливания $I_{\text{ЛН}}$ (+) и произведение испускательной способности АЧТ и коэффициента излучения вольфрама (сплошная кривая)

Планковская аппроксимация спектра интенсивности лампы накаливания

Полученная на основе анализа экспериментальных данных «рекомендованная» зависимость коэффициента излучения вольфрама от длины волны [7–9] в диапазоне длин волн 0,3 – 20 мкм достаточно сложна. Однако в рабочей области СФ-56 она упрощается и ее можно аппроксимировать квадратичной функцией:

$$f_{\text{ки}}(\lambda) = 0,500 + \frac{0,365 - 0,450}{1100 - 300}(\lambda - 300) - \frac{(\lambda - 300)^2}{10^6}. \quad (1)$$

На рис. 4 приведены аппроксимирующая кривая и «рекомендованные» экспериментальные данные [7].

Для корректного измерения спектров интенсивности произвольных источников излучения необходимо сравнить регистрируемый спектр штатной лампы накаливания СФ-56 (КГМ 12-10) с произведением испускательной способности абсолютно черного тела (АЧТ) $\varepsilon(\lambda, T)$ и «рекомендованного» коэффициента излучения вольфрама $k_{\text{изл}}(\lambda, T)$.

Спектр интенсивности КГМ 12-10 можно аппроксимировать планковской зависимостью только на отдельных участках. Наилучшее совпадение регистрируемой интенсивности с произведением функций $\varepsilon(\lambda, T)k_{\text{изл}}(\lambda, T)$ получили в спектральной области 300 – 420 нм (рис. 5).

Используя программу Gnuplot для более широкой области, установили, что максимально широкий интервал длин волн с достаточно высоким сигналом, в котором процедура сходится, — 300 – 750 нм. При этом параметр T в формуле Планка составляет 2655 ± 20 К.

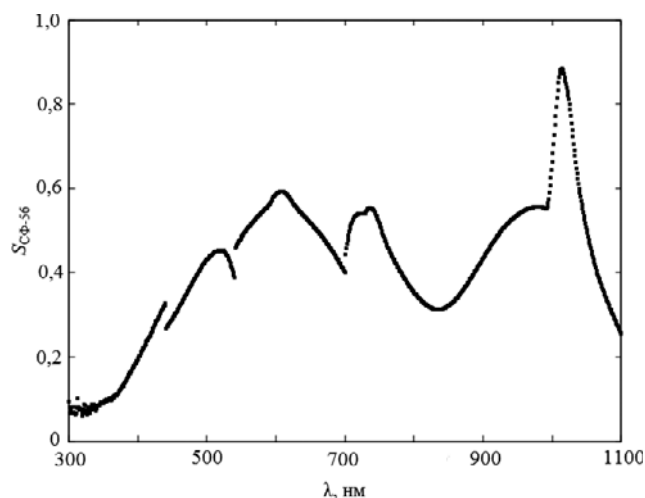


Рис. 6. Спектральная функция СФ 006

Интенсивность, регистрируемую СФ-56, можно выразить следующим образом:

$$I(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T)k_{\text{изл}}(\lambda, T)S_{\text{СФ-56}}(\lambda), \quad (2)$$

где $S_{\text{СФ-56}}(\lambda)$ — спектральная функция спектрофотометра.

Видно, что $S_{\text{СФ-56}}$ можно найти, разделив зарегистрированный спектр $I(\lambda, T)$ на $\varepsilon(\lambda, T) \times k_{\text{изл}}(\lambda, T)$. На рис. 6 приведена спектральная функция прибора 006 с номинальной шириной щели 0,6 нм.

Численные значения спектральной функции спектрофотометра — весовой коэффициент, на который необходимо умножать интенсивности любых исследуемых источников излучения при данных условиях измерения (для каждого прибора эта функция индивидуальна).

Таким образом, предложенная аппроксимационная методика обработки экспериментальных результатов спектрофотометрии позволяет повысить точность определения длины волны максимума линий излучения по сравнению с паспортными данными приборов в 2,5 раза.

Также проведенные исследования показали, что положение максимума реперной линии СФ в течение времени измерений до 6000 с линейно зависит от времени. При этом зависимость интенсивности реперной линии от длительности прогрева прибора нелинейна. В интервале длин волн 300–1100 нм коэффициент излучения вольфрама может быть аппроксимирован квадратической зависимостью. Для корректного измерения спектральных характеристик источников излучения необходимо определить спектральную функцию СФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Спектрофотометр СФ-56. Техническое описание и руководство по эксплуатации. — СПб.: ЛОМО-Спектр, 2007. — 16 с.
2. Никитин В. А. Теоретические основы методологии прецизионной спектрофотометрии. — Л., 1991.
3. Никитин В. А. Форма спектральных линий. <https://bourabai.ru/physics/3795.html> (дата обращения 10.11.2017).
4. Зайдель А. Н., Островская Г. В., Островский Ю. И. Техника и практика спектроскопии. — М.: Наука, 1976. — 392 с.
5. Зайдель А. Н., Прокофьев В. К., Райский С. М. и др. Таблицы спектральных линий. Изд. 2-е, испр. и доп. — М.: Физматгиз, 1962. — 608 с.
6. Ландау Л. Д., Лифшиц И. М. Механика. — М.: ГИФМЛ, 1958. — 207 с.
7. Латышев Л. Н., Петров В. А., Чеховская В. Я. и др. Излучательные свойства твердых материалов: справочник. — М.: Энергия, 1974. — 472 с.
8. Джэмисон Дж. Э., МакФи Р. Х., Пласс Дж. Н. и др. Физика и техника инфракрасного излучения. — М.: Советское радио, 1965. — 639 с.
9. Гуревич М. М. Фотометрия (теория, методы и приборы). — Изд 2-е. — Л.: Энергоатомиздат, 1983. — 268 с.

REFERENCES

1. Spectrophotometer SF-56. Technical description and user manual. — St. Petersburg: LOMO-Spectr, 2007. — 16 p. [in Russian].
2. Nikitin V. A. Theoretical Foundations of the Methodology of Precision Spectrophotometry. — Leningrad, 1991 [in Russian].
3. Nikitin V. A. The form of spectral lines. <https://bourabai.ru/physics/3795.html> (accessed 10.11.2017) [in Russian].
4. Zaidel' A. N., Ostrovskaya G. V., Ostrovsky Yu. I. Technique and practice of spectroscopy. — Moscow: Nauka, 1976. — 392 p. [in Russian].
5. Zaidel A. N., Prokofiev V. K., Raysky S. M., et al. Tables of spectral lines. — Moscow: Fizmatgiz, 1962. — 608 p. [in Russian].
6. Landau L. D., Lifshits I. M. Mechanics. — Moscow: GIFML, 1958. — 207 p. [in Russian].
7. Latiev L. N., Petrov V. A., Chekhovskaya V. Ya., et al. Radiating properties of solid materials: reference book. — Moscow: Energiya, 1974. — 472 p. [in Russian].
8. Jamison J. E., McFee R. H., Plass J. N., et al. Physics and technology of infrared radiation. — Moscow: Sovetskoe radio, 1965. — 639 p. [Russian translation].
9. Gurevich M. M. Photometry (theory, methods and instruments). — Leningrad: Energoatomizdat, 1983. — 268 p. [in Russian].