

МЕТРОЛОГИЯ

2010

август №8

Ежемесячное
приложение
к научно-
техническому
журналу
“ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА”



ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.387.322: 615.831

КАЛИБРОВКА МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ЛАМП С ПОЛЫМ КАТОДОМ

С. А. МИГУНОВ, С. С. КОЛЕСНИКОВА

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, e-mail: migunov-sa@mail.ru

Разработаны методика и аппаратура для калибровки мультиспектральных ламп с полым катодом медицинского назначения с использованием специально созданного измерительно-калибровочного стенда на базе сканирующего спектрофотометра. Приведены оптическая схема и конструкция стендса, алгоритмы обработки данных, структура программного обеспечения и методы контроля метрологических характеристик. Обоснована цепь прослеживаемости калибруемой лампы к государственному первичному эталону спектральной плотности энергетической яркости и представлены результаты измерений мощности на выделенных линиях моно- и мультиспектральных ламп.

Ключевые слова: калибровка, эталон, спектрофотометр, фототерапия, спектральная плотность энергетической яркости.

The method and equipment for multispectral medical hollow cathode lamps (HCL) calibration using a scanning spectrophotometer were developed. The optical system and the structure of the device is described. Data processing algorithms, software structure and metrological characteristics testing methods are considered. The traceability chain from calibrated HCL to state primary standard of spectral density of radiance has been substantiated. The results of power measurements on selected lines of mono- and multispectral HCL are presented.

Key words: calibration, standard, spectrophotometer, phototherapy, energetic radiance spectral density.

Несколько последних десятилетий ознаменованы возрастающим интересом медицины к энергоинформационной терапии, не использующей инъекционные и медикаментозные методы лечения, а интенсифицирующей в организме человека процессы, способствующие повышению его защитных сил. Одним из таких современных методов лечения является спектральная фототерапия (СФТ) – воздействие на

биологически активные кожные зоны организма излучением источника линейчатого спектра в видимом диапазоне длин волн, резонансные линии которого соответствуют материалу тела свечения источника [1]. В качестве источников излучения служат газоразрядные лампы с полым катодом (ЛПК) [2].

Биологический эффект оптического воздействия существенно зависит от спектрального состава, мощности и длительности (экспозиции) применяемых световых импульсов. Поэтому при использовании ЛПК как источника излучения для СФТ прежде всего требуется знать мощность их излучения на отдельных спектральных линиях. Такая информация необходима для выяснения механизмов воздействия излучения ЛПК на организм, оптимизации и регламентирования лечебных процедур, а также для контроля самих ламп. Измерение мощности на отдельных спектральных линиях представляет определенный интерес и при традиционном применении ЛПК в качестве источников света для атомно-абсорбционных спектрометров. В этом случае знание абсолютных значений мощности будет полезно при создании ламп повышенной интенсивности излучения, в том числе многоэлементных.

В настоящее время в литературе представлено мало данных о методах и средствах абсолютных измерений мощности излучения ЛПК на отдельных спектральных линиях. Кроме того, отсутствует какая-либо серийная аппаратура, позволяющая проводить такие измерения с гарантированной точностью и сходимостью результатов. В связи с этим были разработаны и реализованы методики измерений мощности излучения ЛПК на выделенных спектральных линиях. При этом была соблюдена прослеживаемость к одному из первичных эталонов.

Ниже описаны методики и аппаратура для калибровки мультиспектральных ЛПК медицинского назначения с использованием специально разработанного измерительно-калибровочного сканирующего спектрофотометра (в дальнейшем – стенд). Представлены оптическая схема и конструкция стенда, а также алгоритмы обработки данных, структура программного обеспечения и методы контроля метрологических характеристик. Обоснована цепь прослеживаемости калибруемой ЛПК к государственному первичному эталону спектральной плотности энергетической яркости и даны результаты измерений моно- и мультиспектральной ЛПК со спектрами различных составов.

Оптическая схема контрольно-измерительного стенда приведена на рис. 1. При разработке стендла в качестве диспергирующего элемента был выбран перестраиваемый монохроматор МДА-3 с вогнутой голо-

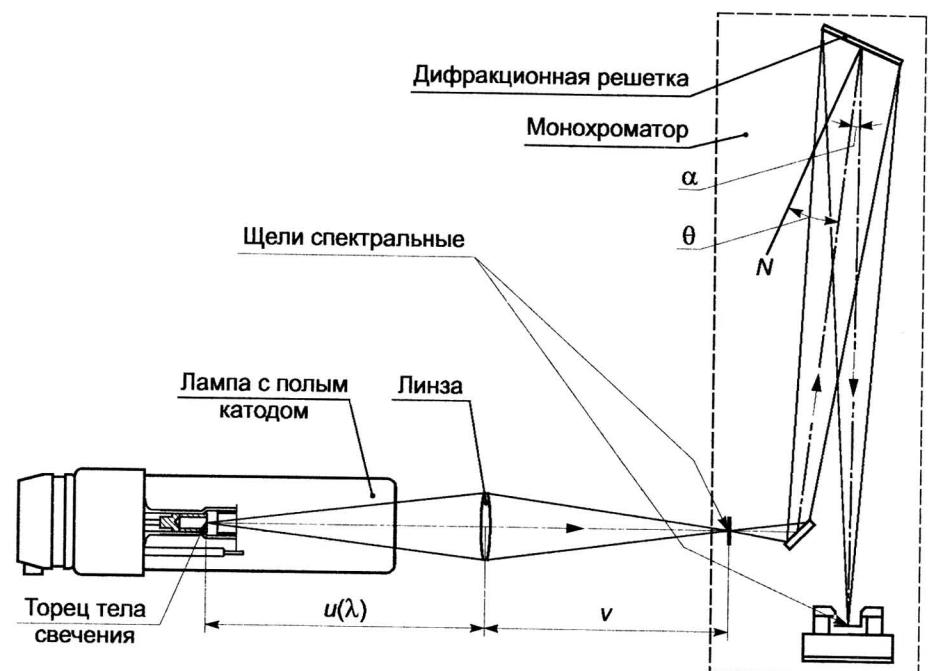


Рис. 1. Оптическая схема измерительно-калибровочного сканирующего спектрофотометра

графической дифракционной решеткой, применяемый в составе атомно-абсорбционного спектрометра «КВАНТ-2А», серийно выпускаемого ООО «КОРТЭК» (Россия). Такой монохроматор позволяет выделять и регистрировать все контрольные линии спектров испускания ЛПК. Кроме того, при разработке системы управления стендом использовано скорректированное для данного случая программное обеспечение (ПО) спектрометра «КВАНТ-2А».

В монохроматоре реализована схема с простым вращением вогнутой дифракционной решетки, т. е. при сканировании спектра решетка вращается относительно оси, проходящей через ее вершину параллельно штрихам, а щели прибора остаются неподвижными, в результате угол $\alpha = 6^{\circ}16' = 0,1093$ рад между падающим и дифрагированным лучами постоянен и выбран с таким учетом, чтобы соотношение поперечных aberrаций решетки и неизбежной дефокусировки оставалось наиболее подходящим. Ось вращения решетки проходит через ее центр, угол

поворота составляет $\theta = 8 \dots 37^\circ$. Подобная схема используется в современных спектральных приборах. В монохроматор входит голограммическая дифракционная решетка с числом штрихов $N = 1800$ нм/мм и радиусом кривизны $R = 250$ мм. Применение голограммической решетки, адаптированной к конкретной оптической схеме, позволило свести к минимуму aberrации, свойственные сферическим дифракционным решеткам.

Излучение контролируемой ЛПК (диаметр торца тела свечения $d = 3,5$ мм) фокусируется на входной щели монохроматора и далее, отражаясь от входного зеркала, попадает на диспергирующий элемент (решетку), пространственно разделяющий лучи разных длин волн и направляющий их под разными углами. В результате в фокальной плоскости формируется спектр – совокупность изображений входной щели в лучах всех длин волн, испускаемых источником (размеры входной и выходной щелей: $b = 0,15$ мм, $h = 3,0$ мм). В процессе измерений выделяемый участок спектра совмещается с выходной щелью автоматическим поворотом решетки. Коррекция зависимости ее фокусного расстояния от длины волны излучения осуществляется автоматическим перемещением решетки вдоль оптической оси. Фокусировка изображения светового пятна тела свечения излучателя на входную щель монохроматора реализуется благодаря применению двояковыпуклой собирающей линзы из стекла КУ-1 ($R_1 = R_2 = 55$ мм; $d_{\text{св}} = 26$ мм), расстояние от линзы до спектральной щели $v = 100$ мм.

Схема контрольно-измерительного стенда показана на рис. 2. На общей плате установлены лампадодержатель 5 с контролируемой ЛПК 6; сканирующий монохроматор 12 с автоматически переключающимися входной 10 и выходной 13 щелями, входным зеркалом 11, поворачивающимся по заданной программе с помощью шагового двигателя 7 дифракционной решеткой 8, синусным механизмом 9 и фотодатчиком 14; электронная плата 4 управления приводными механизмами монохроматора и сопряжения с компьютером и силовой трансформатор 2. На лицевой панели 1 находятся блоки управления и входной разъем для подключения ЛПК, на задней 3 – разъемы для подключения к электрической сети и компьютеру.

С использованием разработанного ПО стенда выполнялись такие функции, как установка дифракционной решетки монохроматора в начальное положение при каждом включении прибора и по команде пользователя; передача микроконтроллеру монохроматора числа,

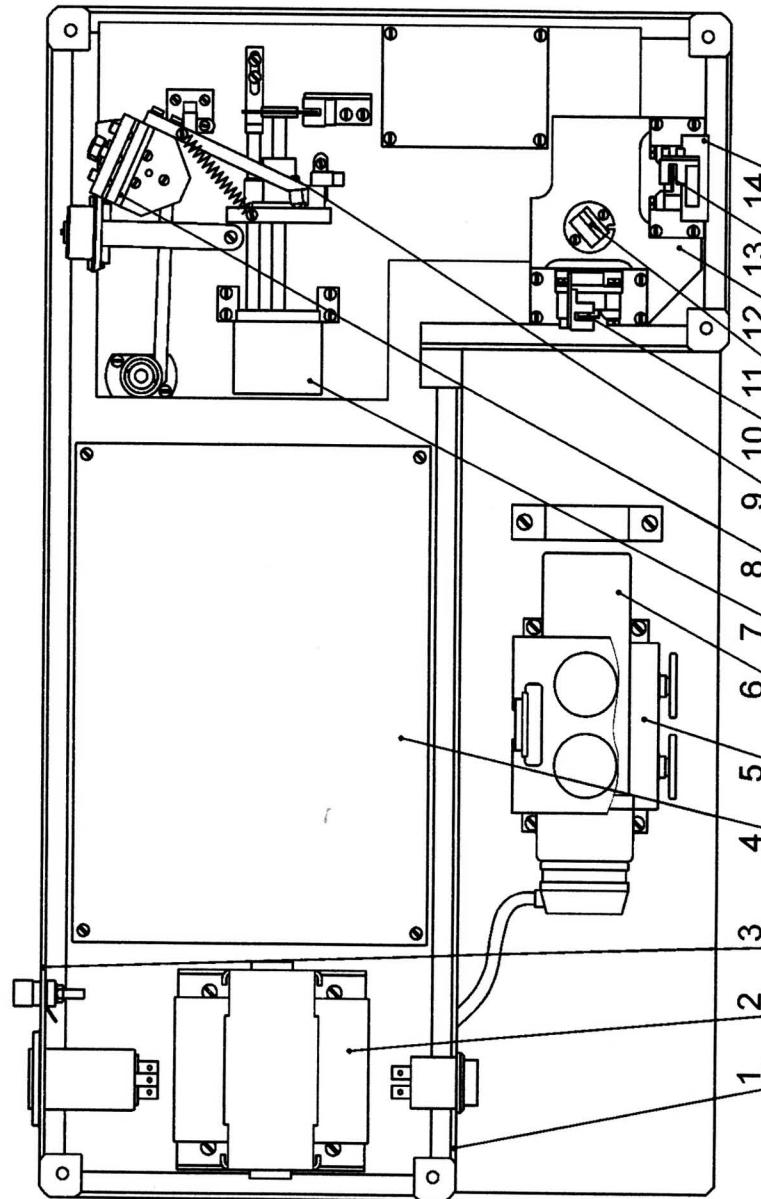


Рис. 2. Контрольно-измерительный стенд:

1 – лицевая панель; 2 – силовой трансформатор; 3 – задняя панель; 4 – электронная плата; 5 – лампадодержатель; 6 – лампа с полым катодом; 7 – шаговый двигатель; 8 – дифракционная решетка; 9 – синусный механизм; 10, 13 – входная и выходная щель монохроматора; 11 – входное зеркало; 12 – сканирующий монохроматор; 14 – фотодатчик

соответствующего заданной длине волны; пошаговое сканирование спектра; калибровка спектральной шкалы по источникам излучения с известными длинами волн; прием излучаемых сигналов и их цифровая фильтрация; вычисление мощности излучения на выделенных спектральных диапазонах (линиях); расчет средних значений параметров, полученных в результате накопления за заданный промежуток времени с простейшей статистической обработкой (средние квадратические отклонения (СКО) и доверительные интервалы); построение по результатам проведенных измерений спектральных кривых (зависимостей мощности излучения от длины волны); хранение данных (сохранение результатов измерений в виде зарегистрированных спектров в выделенных спектральных диапазонах и мощностей излучения на выделенных контрольных спектральных диапазонах и линиях).

Для калибровки стенда по шкале длин волн использовали моноспектральные ЛПК, поскольку они обладают более узкими и стабильными спектральными линиями по сравнению с иными спектральными источниками излучения [3]. Для спектральной калибровки и контроля метрологических характеристик в условиях эксплуатации была выбрана ЛПК со спектром свинца. В спектре ее излучения присутствуют линии как паров свинца, так и неона (газа-заполнителя). Достаточное число четко разрешаемых линий, равномерно расположенных по спектральному диапазону монохроматора, позволяет точно калибровать по шкале длин волн и программным путем корректировать погрешности механизма поворота дифракционной решетки. Таким образом, указанную ЛПК следует считать прототипом разрядного эталона, для которого необходимо обеспечить прослеживаемость к первичной радиометрической шкале.

Калибровку монохроматора осуществляли на минимальной щели при токе лампы 15 мА. Для контроля выбраны высокоинтенсивные (резонансные) линии свинца (283,31; 368,35; 405,78 нм) и неона (585,25; 692,94; 743,89 нм), не имеющие в близлежащей спектральной области соседних линий [4]. Для каждой линии использовали свой коэффициент усиления сигнала.

В базу данных монохроматора при его настройке заносили координаты положения дифракционной решетки для выбранных контрольных линий. После выхода на контрольную линию благодаря ПО имелась возможность пошаговой корректировки ее положения, при котором пиковое значение сигнала на выделенной линии становилось максимальным, а полуширина

решетки на полувысоте сигнала минимальной. Откорректированные значения координат решетки заносили в базу данных.

В дальнейшем помимо спектральной калибровки данную ЛПК применяли и для калибровки шкалы светового потока (мощности).

При анализе проведенных исследований установлено, что наиболее целесообразным является обеспечение прослеживаемости результатов измерений прототипа разрядного эталона измерений к государственному первичному эталону спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ), входящему в состав эталонной базы ВНИИОФИ. При этом цепь прослеживаемости выглядела следующим образом:

от государственного первичного эталона размер единицы СПЭЯ передавался вторичному эталону, а от него – рабочему эталону сравнения – светоизмерительной спектральной лампе СИРШ 6-40 (основные параметры приведены ниже);

с помощью лампы СИРШ 6-40 осуществляли градуировку показаний фотоприемника стенда в единицах мощности, излучаемой в телесный угол эталона Ω_2 ;

на калиброванном стенде проводили измерение мощности, излучаемой в телесный угол $\Omega_{ЛПК}$ для исследуемых ламп.

При этом учитывали площади тел свечения, телесные углы, в которых собиралось излучение, а также коэффициенты прохождения излучения через входную щель монохроматора.

Технические характеристики светоизмерительной лампы накаливания СИРШ 6-40

Предельные значения:

напряжения, не менее	6 В
силы тока, не более	7 А

Номинальная цветовая температура тела накала 2840 К

Стабильность световых параметров в течение 200 ч

Размеры, не более:

длина	37 мм
-------------	-------

диаметр	155 мм
---------------	--------

высота	81 мм
--------------	-------

Тип цоколя согласно ГОСТ 13874-76 Е27/30.

Метод контроля метрологических характеристик ЛПК. На первом этапе были проведены метрологические исследования лампы СИРШ 6-40 на вторичном эталоне единицы СПЭЯ лаборатории радиометрии и радиационной термометрии ВНИИОФИ (протокол № 186 от 02.02.2010 г.). Исследования были выполнены в соответствии с [5, 6]

с применением рабочего эталона единицы силы излучения и энергетической освещенности непрерывного оптического излучения в диапазоне длин волн 0,2 – 0,25 мкм ВЭТ 86-4-2003.

Лампу устанавливали вертикально цоколем вниз и юстировали так, чтобы оптическая ось спектрометра совпадала с направлением, проходящим через центр тела свечения по ширине и высоте по нормали к нему. Погрешность юстировки не превышала по ширине тела свечения 0,1 мм, по высоте 0,2 мм. Питание лампы осуществлялось постоянным током силой $4,12 \pm 0,003$ А. Визируемый участок тела свечения составлял по ширине 0,6 мм, по высоте 0,8 мм; световой телесный угол 0,008 ср; спектральная полуширина пропускания спектрометра 1,1 нм в диапазоне длин волн 250 – 600 нм и 2,2 нм в диапазоне 600 – 800 нм. Полученные в результате исследований данные приведены в табл. 1.

На втором этапе были измерены выходные сигналы аттестованной светоизмерительной лампы на разработанном стенде. Лампу устанавливали в ламподержатель стенда так, чтобы оптическая ось монохроматора проходила через центр тела свечения лампы, при этом расстояние от плоскости тела свечения до центра фокусирующей линзы для каждого значения длины волн рассчитывали заранее. Питание лампы осуществлялось от образцового источника, обеспечивающего стабильный ток силой $4,12 \pm 0,003$ А. Ширина входной щели монохроматора 0,15 мм, коэффициент усиления сигнала 1,6. По внешним командам монохро-

матор выводился на линии, указанные в табл. 1. При этом фиксировалась и запоминались значения полученных амплитуд сигналов в выделенных спектральных диапазонах.

На третьем этапе для измерения мощности контрольных ЛПК на выделенных спектральных линиях была рассчитана калибровочная функция с учетом данных, полученных на втором этапе.

Сигнал от эталонного источника излучения (светоизмерительной лампы СИРШ 6-40) на стенде описывается формулой

$$\mathcal{E}(\lambda) = T(\lambda) \text{СПЭЯ}(\lambda) \Delta_\lambda(\lambda) \Omega_3(\lambda) k_3(\lambda) S_3, \quad (1)$$

где $T(\lambda)$ – чувствительность контрольно-измерительного стенда, определяемая параметрами оптической системы и фотоприемника; $\text{СПЭЯ}(\lambda)$ – спектральная плотность энергетической яркости эталонного источника излучения на выделенном спектральном интервале; $\Delta_\lambda(\lambda)$ – спектральная ширина щели монохроматора; $\Omega_3(\lambda)$ – телесный угол, под которым собирается излучение эталонного источника; $k_3(\lambda)$ – коэффициент прохождения излучения от указанного источника излучения; S_3 – площадь тела свечения эталонного источника (лента шириной b_3 и высотой h_3).

Коэффициент прохождения излучения определяется как

$$k_3(\lambda) = S_{\text{щ}} / S_{\text{и.з}}(\lambda) = S_{\text{щ}} u(n)^2 / (S_3 v^2) = b_{\text{щ}} h_{\text{щ}} u(n)^2 / (S_3 v^2). \quad (2)$$

Здесь $S_{\text{щ}}$, $b_{\text{щ}}$, $h_{\text{щ}}$ – площадь, ширина и высота щели монохроматора; $S_{\text{и.з}}(\lambda)$ – площадь изображения тела свечения в плоскости входной щели монохроматора (энергетическая освещенность этого изображения в данной плоскости предполагается равномерной); $u(n)$ – расстояние от плоскости тела свечения до центра фокусирующей линзы; n – показатель преломления материала линзы при различных длинах волн; v – расстояние от плоскости входной щели монохроматора до центра фокусирующей линзы (для примененной в стенде оптической схемы $v = \text{const}$).

Для расчета расстояния до центра линзы используются формулы [7]:

$$1/u(n) + 1/v = 1/f(n); \quad (3)$$

$$1/f(n) = [n(\lambda) - 1] \left\{ 2/R + [n(\lambda) - 1] s / [n(\lambda) R^2] \right\}, \quad (4)$$

Таблица 1

Результаты исследования метрологических характеристик светоизмерительной лампы СИРШ 6-40

Длина волны, нм	СПЭЯ, Вт·м ⁻³ ·ср ⁻¹	Относительная погрешность измерения, %	Длина волны, нм	СПЭЯ, Вт·м ⁻³ ·ср ⁻¹	Относительная погрешность измерения, %
290	$2,575 \cdot 10^4$	10,0	390	$2,836 \cdot 10^8$	6,0
300	$1,681 \cdot 10^5$	8,0	400	$3,801 \cdot 10^8$	5,5
310	$5,974 \cdot 10^6$	8,0	450	$1,283 \cdot 10^9$	3,8
320	$1,437 \cdot 10^6$	8,0	500	$3,173 \cdot 10^9$	3,7
330	$2,730 \cdot 10^7$	8,0	550	$6,391 \cdot 10^9$	3,6
340	$4,557 \cdot 10^7$	8,0	600	$1,103 \cdot 10^{10}$	3,5
350	$7,064 \cdot 10^7$	6,0	650	$1,711 \cdot 10^{10}$	3,5
360	$1,045 \cdot 10^8$	6,0	700	$2,344 \cdot 10^{10}$	3,5
370	$1,495 \cdot 10^8$	6,0	750	$3,023 \cdot 10^{10}$	3,5
380	$2,081 \cdot 10^8$	6,0	800	$3,683 \cdot 10^{10}$	3,5

где $f(n)$ – фокусное расстояние линзы, s – ее толщина (расстояние между сферическими поверхностями линзы вдоль оптической оси), R – радиус кривизны.

Из (3), (4) следует

$$u(n) = \frac{vR^2 n(\lambda)}{[2vRn(\lambda) - sv][n(\lambda) - 1] - R^2 n(\lambda)}. \quad (5)$$

В [8] приведены табличные значения показателей преломления $n(\lambda)$ для стекла марки КУ-1, из которого изготовлена линза, при различных длинах волн. Для диапазона длин волн 302,15 – 852,11 нм с использованием специализированного ПО выполняли аппроксимацию табличных данных показателей преломления $n(\lambda)$ от 214,438 до 1013,98 нм. Полученная зависимость описывается полиномом 4-й степени, найденным методом наименьших квадратов:

$$n(\lambda) = a_0 + a_1\lambda + a_2\lambda^2 + a_3\lambda^3 + a_4\lambda^4, \quad (6)$$

где $a_0 = 1,71185762842054$; $a_1 = -0,00145917622521174$; $a_2 = 3,25624262301211 \cdot 10^{-6}$; $a_3 = -3,30347243442338 \cdot 10^{-9}$; $a_4 = 1,25865790449723 \cdot 10^{-12}$.

При измерении на стенде сигналов $\mathcal{E}(t)$ и $A(\lambda)$ от эталонного источника излучения и сигнала от ЛПК на выделенных длинах волн λ , источники излучения устанавливали в положения, соответствующие расстоянию $u(n)$, рассчитанному по (5) с учетом (6).

Поскольку отношение $d_{\text{св}}/u(n)$, где $d_{\text{св}}$ – световой диаметр линзы, достаточно мало, принято

$$\Omega_3(\lambda) = \pi d_{\text{св}}^2 / (4u(n)^2). \quad (7)$$

После подстановки (2), (7) в (1) получаем

$$\mathcal{E}(\lambda) = T(\lambda) \text{СПЭЯ}(\lambda) \Delta_\lambda(\lambda) \pi d_{\text{св}}^2 b_{\text{ш}} h_{\text{ш}} / (4v^2). \quad (8)$$

Сигнал, полученный от ЛПК на стенде, имеет вид

$$A(\lambda) = T(\lambda) P(\lambda) k_{\text{ЛПК}}, \quad (9)$$

где $P(\lambda)$ – мощность излучения лампы на выделенной спектральной линии λ , собираемая в телесном углу $\Omega_{\text{ЛПК}}$; $k_{\text{ЛПК}}$ – коэффициент прохождения излучения контрольной лампы,

$$k_{\text{ЛПК}}(\lambda) = S_{\text{ш}} / S_{\text{и.ЛПК}}(\lambda), \quad (10)$$

$S_{\text{и.ЛПК}}(\lambda)$ – площадь изображения тела свечения лампы в плоскости входной щели монохроматора (энергетическая освещенность изображения в данной плоскости предполагается равномерной).

Возможны два случая, когда диаметр $d_{\text{и.ЛПК}}$ изображения тела свечения лампы больше или меньше высоты щели монохроматора:

$$d_{\text{и.ЛПК}} \geq h_{\text{ш}}$$

$$k_{\text{и.ЛПК}}(\lambda) = S_{\text{ш}} / S_{\text{ЛПК}}(\lambda) = 4h_{\text{ш}} b_{\text{ш}} / (\pi d_{\text{и.ЛПК}}^2(\lambda)) = 4h_{\text{ш}} b_{\text{ш}} u(n)^2 / (\pi v^2 d_{\text{ЛПК}}^2),$$

откуда с учетом (8), (9) получали

$$\begin{aligned} P_1(\lambda) &= A(\lambda) \frac{\text{СПЭЯ}(\lambda) \Delta_\lambda(\lambda)}{\mathcal{E}(\lambda)} \frac{\pi d_{\text{св}}^2 b_{\text{ш}} h_{\text{ш}}}{4v^2} \frac{\pi v^2 d_{\text{ЛПК}}^2}{4h_{\text{ш}} b_{\text{ш}}} \frac{1}{u(n)^2} = \\ &= A(\lambda) F(\lambda) \left(\pi d_{\text{св}} / 4 \right)^2 d_{\text{ЛПК}}^2 / u(n)^2; \end{aligned} \quad (11)$$

$$d_{\text{и.ЛПК}} < h$$

$$k_{\text{2ЛПК}}(\lambda) = S'_{\text{ш}} / S_{\text{ЛПК}}(\lambda) = 4d_{\text{ЛПК}}(\lambda) b_{\text{ш}} / (\pi d_{\text{и.ЛПК}}^2(\lambda)) = 4b_{\text{ш}} u(n) / (\pi v d_{\text{ЛПК}}),$$

откуда также с учетом (8), (9) находили

$$\begin{aligned} P_2(\lambda) &= A(\lambda) \frac{\text{СПЭЯ}(\lambda) \Delta_\lambda(\lambda) \Omega_3(\lambda)}{\mathcal{E}(\lambda)} \frac{\pi d_{\text{св}}^2 b_{\text{ш}} h_{\text{ш}}}{4v^2} \frac{\pi v d_{\text{ЛПК}}}{4b} \frac{1}{u(n)} = \\ &= A(\lambda) F(\lambda) \left(\pi d_{\text{св}} / 4 \right)^2 h_{\text{ш}} d_{\text{ЛПК}} / (v u(n)), \end{aligned} \quad (12)$$

где $d_{\text{ЛПК}}$ – диаметр тела свечения ЛПК; $S'_{\text{ш}}$ – заполняемая светом площадь щели; $F(\lambda)$ – калибровочная функция стенда [Вт/мм²],

$$F(\lambda) = [\text{СПЭЯ}(\lambda) \Delta_\lambda(\lambda) \Omega_3(\lambda) / \mathcal{E}(\lambda)] \cdot 10^{-15}.$$

Спектральную ширину щели монохроматора Δ_λ [нм] вычисляли по выражению

$$\Delta_\lambda(\lambda) = \frac{d\lambda}{dl} b_{\text{ш}} \cdot 10^6 = \frac{\cos \varphi(\lambda)}{NR} b_{\text{ш}} \cdot 10^6. \quad (14)$$

Здесь $d\lambda/dl$ – обратная линейная дисперсия [нм/мм]; φ – угол дифракции.

Угол φ дифракции связан с углом θ поворота дифракционной решетки (из положения, соответствующего нулевому порядку дифракции, в положение, соответствующее длине волны λ) и углом α между падающим и дифрагированным лучами соотношением

$$\varphi(\lambda) = \theta(\lambda) + \alpha/2. \quad (17)$$

Для используемого монохроматора $\alpha = \text{const}$, тогда для первого порядка дифракции

$$\theta(\lambda) = \arcsin \left[N\lambda / (2 \cos \alpha / 2) \right],$$

отсюда

$$\varphi(\lambda) = \arcsin \left[N\lambda / (2 \cos \alpha / 2) \right] + \alpha / 2.$$

Калибровочную функцию строили по следующему алгоритму с использованием специального ПО.

1. Для выбранного массива значений длин волн λ_i вычислялись соответствующие расстояния $u_i(\lambda)$.

2. Для каждого значения λ_i измеряли параметры эталонной лампы: $СПЭЯ(\lambda_i)$ на вторичном эталоне; $\mathcal{E}(\lambda_i)$ на стенде при фиксированных расчетных $u(\lambda_i)$.

3. По формулам (7), (12) – (14) для выбранного массива длин волн рассчитывались $\Omega_3(\lambda_i)$, $\varphi(\lambda_i)$, $F(\lambda_i)$, $\Delta(\lambda_i)$, соответственно.

4. Весь диапазон длин волн разбивался на два интервала: $300 \leq \lambda_i < 420$ нм (1) и $420 \leq \lambda_i \leq 800$ нм (2), на каждом из которых для массива данных $F_i = F(\lambda_i)$ вычислялись аппроксимирующие полиномы 4-й степени. Критерием аппроксимации являлась минимизация среднеквадратического отклонения $\frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (F'(\lambda_i) - F(\lambda_i))^2}$:

$$y_{(1)}(\lambda) = b_0 F_{\max} + b_1 F_{\max} (\lambda / \lambda_{\max}) + b_2 F_{\max} (\lambda / \lambda_{\max})^2 + \\ + b_3 F_{\max} (\lambda / \lambda_{\max})^3 + b_4 F_{\max} (\lambda / \lambda_{\max})^4;$$

$$y_{(2)}(\lambda) = c_0 F_{\max} + c_1 F_{\max} (\lambda / \lambda_{\max}) + c_2 F_{\max} (\lambda / \lambda_{\max})^2 + \\ + c_3 F_{\max} (\lambda / \lambda_{\max})^3 + c_4 F_{\max} (\lambda / \lambda_{\max})^4,$$

где $b_0 = 51,0560724606423$; $b_1 = -432,568641631731$; $b_2 = 1343,4688235895$; $b_3 = -1810,6737386065$; $b_4 = 896,21617593104$; $c_0 = 12,4936863981261$; $c_1 = -66,0364523387555$; $c_2 = 133,622117030471$; $c_3 = -120,949096792762$; $c_4 = 41,8688687719114$.

Здесь $y_{(1)}(\lambda) = F_{(1)}/F_{\max}$, $y_{(2)}(\lambda) = F_{(2)}/F_{\max}$ – калибровочные функции в диапазонах 300 – 420 нм (1) и 420 – 800 нм (2), соответственно; $\lambda_{\max} = 800$ нм – максимальное значение длины волны; F_{\max} – максимумы калибровочной функции $F(\lambda)$ в указанных диапазонах.

Результаты расчета с шагом 50 нм представлены в табл. 2 и на рис. 3.

На четвертом этапе с использованием полученных на третьем этапе градиуровочных зависимостей измеряли амплитуду выходной мощности исследуемой ЛПК на выделенных контрольных линиях после настройки стенда на выбранную спектральную линию. Мощность определяли по формулам (11), (12). На ЛПК подавалось напряжение, соответствующее ее паспортному значению, ширину входной щели монохроматора и коэффициент усиления сигнала устанавливали такими же, как и при измерениях с использованием эталонной лампы, после чего проводили предварительный прогрев ЛПК в течение 20 мин. Перед каждым очередным измерением лампу располагали в позицию, соответствующую рассчитанному значению $u(n)$ для данной длины волны, затем юстировали ее положение в ламподержателе и корректировали координаты дифракционной решетки при достижении максимума сигнала.

В табл. 3 приведены результаты измерений мощности излученияmono- (спектры Pb и Ne) и мультиспектральной (спектры Na, Ca, Mg, Mn, Cu, Ne) ЛПК, а на рис. 4 представлены формы сигналов на выделенных контрольных линиях исследованной мультиспектральной лампы.

Проведенные с использованием контрольно-измерительного стенда исследования показали, что основными источниками погрешности изме-

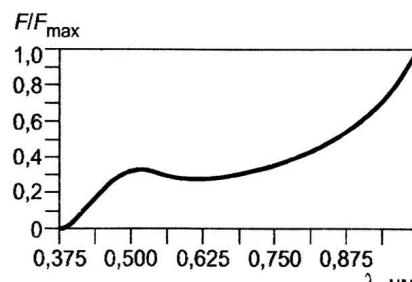


Рис. 3. Калибровочная функция
стенда

Т а б л и ц а 2

Расчетные и измеренные параметры эталонного источника – лампы СИРШ 6-40

λ , нм	$СПЭЯ(\lambda)$, Вт·м ⁻³ ·ср ⁻¹	$u(\lambda)$, мм	$\vartheta(\lambda)$	$F(\lambda)$, Вт·мм ⁻²	yF_{\max} , Вт·мм ⁻²
300	$1,681 \cdot 10^6$	132,4	300	$5,350 \cdot 10^{-14}$	$5,9682 \cdot 10^{-14}$
350	$7,064 \cdot 10^7$	139,7	385	$1,547 \cdot 10^{-12}$	$1,5215 \cdot 10^{-12}$
400	$3,801 \cdot 10^8$	145,1	980	$2,973 \cdot 10^{-12}$	$2,9621 \cdot 10^{-12}$
450	$1,283 \cdot 10^9$	148,8	3330	$2,742 \cdot 10^{-12}$	$2,7209 \cdot 10^{-12}$
500	$3,173 \cdot 10^9$	151,3	8230	$2,581 \cdot 10^{-12}$	$2,5795 \cdot 10^{-12}$
550	$6,391 \cdot 10^9$	153,1	14520	$2,789 \cdot 10^{-12}$	$2,8116 \cdot 10^{-12}$
600	$1,103 \cdot 10^{10}$	154,6	20400	$3,242 \cdot 10^{-12}$	$3,2666 \cdot 10^{-12}$
650	$1,711 \cdot 10^{10}$	156,0	24220	$3,991 \cdot 10^{-12}$	$3,9367 \cdot 10^{-12}$
700	$2,344 \cdot 10^{10}$	157,3	24960	$4,969 \cdot 10^{-12}$	$4,9567 \cdot 10^{-12}$
750	$3,023 \cdot 10^{10}$	158,6	22680	$6,553 \cdot 10^{-12}$	$6,6041 \cdot 10^{-12}$
800	$3,683 \cdot 10^{10}$	159,5	17950	$9,308 \cdot 10^{-12}$	$9,2994 \cdot 10^{-12}$

Т а б л и ц а 3

Результаты измерений мощности на выделенных спектральных линиях моно- и мультиспектральной ЛПК

λ , нм	$A(\lambda)$	$u(\lambda)$, мм	$\Omega(\lambda)$, ср	$P(\lambda)$, нВт
ЛПК «Pb» (зав. № 38126)				
368,35	14400	141,9	0,0264	9,82
405,78	20180	145,6	0,0250	18,56
585,25	47000	154,2	0,0223	41,49
692,94	26000	157,1	0,0215	34,62
743,89	5100	158,4	0,0211	8,95
ЛПК «K-Na-Ca-Mg-Mn-Cu» (зав. № 9150Д)				
324,75 (Cu)	16100	136,3	0,0286	2,87
383,83 (Mg)	2760	143,5	0,0258	2,25
403,08 (Mn)	13260	145,3	0,0251	11,95
422,67 (Ca)	10080	146,9	0,0246	9,17
589,00 (Na)	52900	154,3	0,0223	47,23
766,49 (K)	15430	158,9	0,0210	31,22

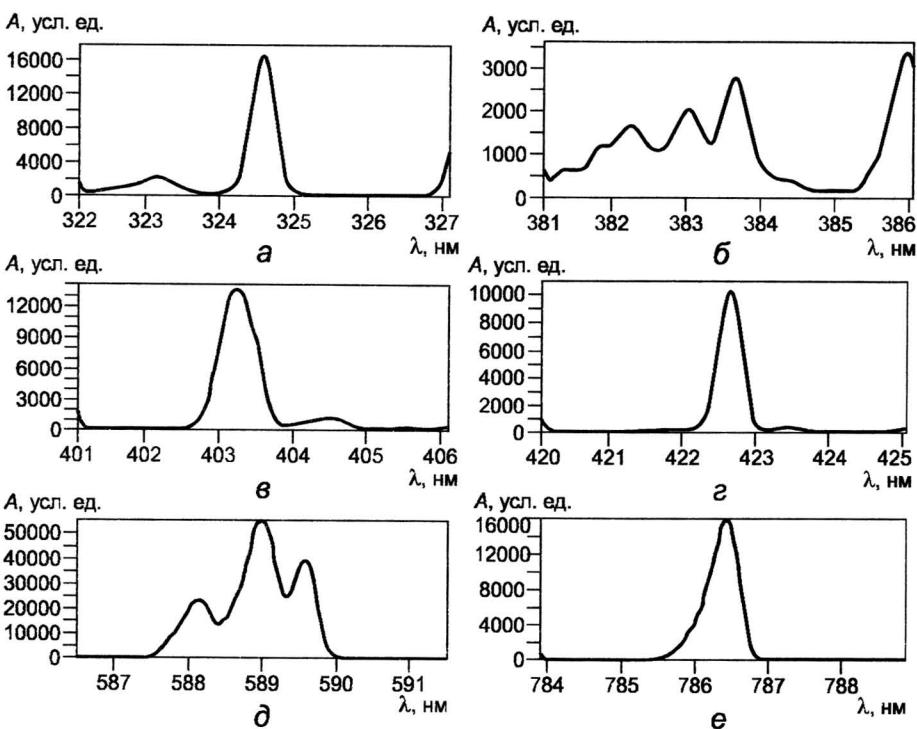


Рис. 4. Формы сигналов (амплитуды мощности) на выделенных контрольных линиях мультиспектральной лампы с полым катодом K-Na-Ca-Mg-Mn-Cu (зав. № 9150Д) при различных λ : 324,74 нм (а); 383,83 нм (б); 403,08 нм (в); 422,67 нм (г); 589,0 нм (д); 766,49 нм (е)

рений мощности являются суммарная погрешность измерения СПЭЯ (протокольные значения до 8 %) и неравномерность энергетической освещенности в плоскости входной щели монохроматора (до 15 %). Остальные составляющие не превышают 2 %. Суммарная среднеквадратичная погрешность измерений на выделенных линиях в диапазоне 300 – 800 нм составила 12 %.

Для повышения точности результатов измерений мощности ЛПК на выделенных линиях требуются дополнительные исследования и накопление статистических данных для получения расчетных зависимостей распределения энергетической освещенности по площади сфокусированного на входную щель монохроматора изображения тела свечения (см. (10)).

Для снижения погрешности измерения СПЭЯ на вторичном эталоне ВЭТ 86-4-2003 лаборатории радиометрии и радиационной термометрии ВНИИОФИ необходимо проводить работы, связанные с переоснащением эталонной базы, корректировкой методики измерений и необходимостью ее дальнейшей аттестации в государственных службах метрологического контроля.

Выводы. Предложена и реализована методика измерения сверхслабых потоков излучения (мощностей) на отдельно выделенных спектральных линиях для моно- и мультиспектральных ЛПК. При этом обеспечена их прослеживаемость к государственному первичному эталону единицы СПЭЯ, входящему в состав эталонной базы ВНИИОФИ.

Для сравнения мощностей калиброванной на эталоне образцовой лампы накаливания СИРШ 6-40 и исследуемых ЛПК использовали специально разработанный стенд на базе монохроматора серийно выпускаемого спектрометра «КВАНТ-2А».

Применение созданной методики настройки монохроматора позволило обеспечить требуемую точность калибровки стенда по шкале длин волн, а также осуществить оперативный контроль точности установки длины волны и спектрального разрешения во всем контролируемом диапазоне спектра.

С помощью созданного измерительно-калибровочного комплекса проведены измерения сверхслабых мощностей излучения на отдельно выделенных контрольных спектральных линиях ЛПК, применяемых для спектральной фототерапии. Суммарная среднеквадратичная погрешность измерений не превысила 12 %. Полученные данные можно использовать для оценки эффективности воздействия мультиспектральных источников на организм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рукин Е. М., Мигунов С. А., Творогова А. В. Спектральная фототерапия. Сообщение 3: Методики использования при некоторых заболеваниях //Рефлексотерапия. 2006. № 1. С. 21 – 24.
- 2 Мигунов С. А., Рукин Е. М., Творогова А. В. Аппаратура для спектральной фотохромотерапии // Оптико-электронные измерения /Под ред. В. С. Иванова. М.: Университетская книга, 2005. С. 675 – 679.
3. Левин А. Д. Методы и средства спектрофотометрии и спектральной нефелометрии для исследования жидких биоорганических сред: Автореф. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук, ВНИИОФИ. М., 2007.

4. Зайдель А. Н. Таблицы спектральных линий /Под ред. А. Н. Зайделя и др. М., 1977.

5. МИ 2184-92. ГСИ. Средства измерений спектральной плотности энергетической яркости, спектральной плотности силы излучения и спектральной плотности энергетической освещенности непрерывного оптического излучения в диапазоне длин волн 0,25...25,0 мкм образцовые и рабочие. Методика поверки.

6 ГОСТ 8.195-89. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений спектральной плотности энергетической яркости, спектральной плотности силы излучения и спектральной плотности энергетической освещенности в диапазоне длин волн 0,25 – 25,00 мкм; силы излучения и энергетической освещенности в диапазоне длин волн 0,2 – 25,0 мкм.

7. Ландсберг Г. С. Оптика. Учеб. пособие для высш. учеб. заведений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.

8 ГОСТ 15130-86. Стекло кварцевое оптическое. Общие технические условия.

Дата принятия 24.06.2010 г.