

Российская измерительная техника. Приборная серия «ТКА»

Константин ТОМСКИЙ,
д. т. н., профессор
Владимир КУЗЬМИН,
д. т. н.
Юрий БАРБАР,
к. т. н.

Для обеспечения контроля основных световых параметров источников оптического излучения, а также параметров микроклимата на научно-техническом предприятии «ТКА» разработаны надежные, малогабаритные, серийно производимые измерительные приборы в ранге рабочих средств измерений и рабочих эталонов с соответствующим метрологическим и методическим обеспечением. Необходимость оперативного и достоверного измерения основных световых параметров источников излучения в видимой области спектра, таких, как координаты цветности, коррелированная цветовая температура, яркость, освещенность, коэффициент пульсации и облученности в УФ области спектра, создаваемой этими источниками, очевидна. Она продиктована бурным развитием альтернативных источников оптического излучения (светодиодов), появлением различных вариантов дисплеев, световых табло, а также технологическими процессами, использующими источники оптического излучения.

Общая концепция построения приборов

Авторы разработали измерительные приборы двух типов: интегрального и спектрального.

Фотоприемные устройства (ФПУ), являясь основной частью прибора интегрального типа для измерения оптического излучения, должны отвечать ряду электрических и фотометрических требований, зависящих от области применения и назначения. Фотоприемное устройство состоит, как правило, из трех частей, что показано на структурной схеме ФПУ (рис. 1)

Устройство для формирования пространственной характеристики может быть выполнено в виде «косинусной насадки» или объектива, формирующего заданный угол зрения.

Преобразователь оптического излучения в электрический сигнал может состоять из одного или нескольких фотоприемников, спектральные характеристики которых коррелированы под решение заданной задачи.

Для люксметра, пульсметра и яркомера используется фотоприемник, спектральная характеристика которого соответствует относительной световой эффективности $V(\lambda)$. Для колориметра используются фотоприемники со спектральными характеристиками, с помощью светофильтров приведенными к виду удельных координат $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1931 г. или 1964 г. Для работы в ультрафиолетовой области спектральные характеристики приемников максимально приближают к П-образному виду или к заданной эффективности.

Фотоприемное устройство прибора спектрального типа несколько отличается от приборов интегрального типа (рис. 2).

Устройство для формирования пространственной характеристики принципиально не отличается от устройства, используемого в приборе интегрального типа. Все осталь-

ные функциональные узлы существенно различаются используемыми элементами и принципами работы.

Излучение исследуемого источника, пройдя отделение для формирования пространственной характеристики, попадает в диспергирующее устройство. Устройство представляет собой полихроматор с регистрацией разложенного излучения фотодиодной линейкой. Рабочий спектральный диапазон обусловлен характером поставленных задач.

При определении коррелированной цветовой температуры применяется переход от системы цветных координат (x, y) МКО 1931 г. в более равноконтрастную систему (u', v') МКО 1976 г. [1–8].

Спектральная плотность энергетической светимости $M_{e\lambda}$ [Вт/м³] абсолютно черного тела (АЧТ) определялась в соответствии с законом Планка по формуле:

$$M_{e\lambda} = C_1 / (\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)). \quad (1)$$

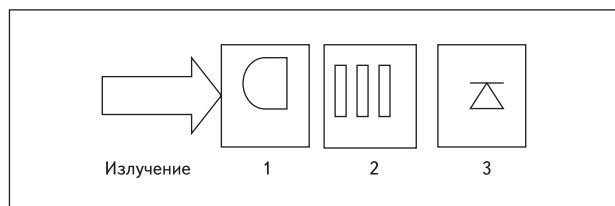


Рис. 1. Структурная схема ФПУ прибора интегрального типа:
1 — устройство для формирования пространственной характеристики;
2 — корректирующее устройство; 3 — преобразователь

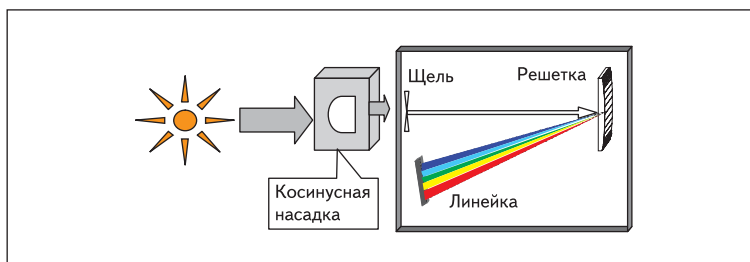


Рис. 2. Структурная схема ФПУ прибора спектрального типа

Координаты цвета АЧТ при данной температуре T рассчитывались по формулам:

$$\begin{cases} X = k_1 \times \int \Phi_{\text{эл}}(\lambda) \times x(\lambda) \times d\lambda, \\ Y = k_2 \times \int \Phi_{\text{эл}}(\lambda) \times y(\lambda) \times d\lambda, \\ Z = k_3 \times \int \Phi_{\text{эл}}(\lambda) \times z(\lambda) \times d\lambda, \end{cases} \quad (2)$$

где $\Phi_{\text{эл}}(\lambda)$ — спектральная плотность потока излучения, $k = 100 \int S(\lambda) \times y(\lambda) \times d\lambda$ — нормировочный коэффициент для приведения координаты Y к значению 100.

Координаты цветности рассчитывались таким образом:

$$x = X/(X+Y+Z), \quad y = Y/(X+Y+Z). \quad (3)$$

Координаты цветности линии АЧТ в системе x, y МКО 1931 г. переводились в равноконтрастную систему u, v МКО 1976 г. по следующим формулам:

$$\begin{cases} u' = 4x/(-2x+12y+3), \\ v' = 9y/(-2x+12y+3). \end{cases} \quad (4)$$

Такой же пересчет цветности производился для исследуемого источника излучения. Затем определялся массив координат цветности АЧТ и соответствующий массив температур.

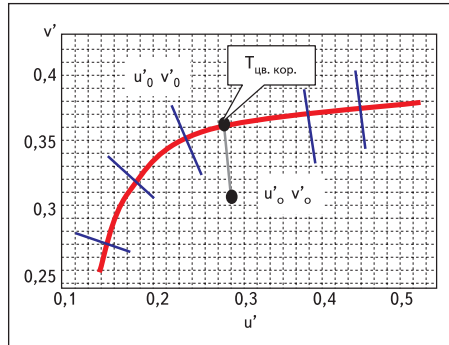


Рис. 3. Линия АЧТ в системе цветных координат u', v'

Минимальное расстояние в пространстве u, v между точкой цветности исследуемого источника (u'_0, v'_0) и точками цветности массива линии АЧТ (u'_i, v'_i) (рис. 3) определялось по формуле

$$\Delta = \sqrt{(u'_0 - u'_i)^2 + (v'_0 - v'_i)^2}. \quad (5)$$

Затем сопоставлялся рассчитанный массив цветности и массив температур АЧТ и определялась температура исследуемого источника T_j , соответствующая определенной точке цветности (u_j, v_j).

Выбор метода определения энергетических характеристик источников ультрафиолетового излучения

Ультрафиолетовое излучение в 1963 году международная комиссия по освещению

(МКО) предложила разделить на три зоны со следующими границами между ними:

- УФ-А — 315–400 нм;
- УФ-В — 280–315 нм;
- УФ-С — 200–280 нм.

Для измерения использовались в основном ФПУ на основе трех широкозонных фотодиодов (например, GaP), спектральная коррекция чувствительности которых максимально приближалась к П-образной. Изначально было понятно, что идеальной коррекции чувствительности фотодиодов достигнуть не удастся из-за ограниченной номенклатуры цветных стекол. Приборы на основе таких фотоприемников обычно имеют повышенную погрешность, определяемую коррекцией, и, как следствие, ограничение по применению. Для достижения более высоких точностей измерения ультрафиолетового излучения потребовались принципиально отличные от предыдущих метод и организация измерительного прибора.

Искомый поток излучения можно получить, интегрируя функцию спектральной плотности в заданном спектральном диапазоне

$$\Phi_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\text{эл}}(\lambda) d\lambda. \quad (6)$$

Такой путь определения интегральных характеристик излучения через интегрирование функции спектральной плотности в ультрафиолетовой области спектра решает многие проблемы, присущие приборам классического типа. Он дает возможность отказаться от коррекции спектральной чувствительности фотоприемников цветными стеклами и тем самым свести к минимуму суммарную погрешность измерения излучения. Фотоприемное устройство при этом принципиально ничем не отличается от спектрального типа, рассмотренного выше. Остались определенные трудности с выбором материалов и фотодиодной линейки для работы в ультрафиолетовой области спектра, но они в настоящее время известны и преодолимы.

Измерение коэффициента пульсации источников излучения

Излучение газоразрядных ламп и ламп накаливания при питании от сети переменного тока (как правило, с частотой 50 Гц) является пульсирующим. Частота пульсации при этом равна удвоенной частоте питающего напряжения, то есть 100 Гц. В качестве критерия оценки относительной глубины колебаний освещенности в результате изменения во времени светового потока источников излучения при питании их переменным током введен коэффициент пульсации освещенности (K_n), выражаемый формулой:

$$K_n = (E_{\text{max}} - E_{\text{min}}) / 2E_{\text{cp}} \times 100\%, \quad (7)$$

где E_{max} — максимальное значение амплитуды переменной составляющей освещенности,

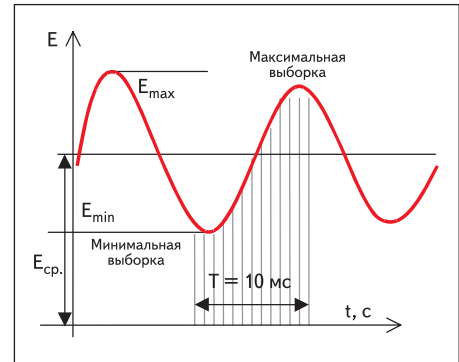


Рис. 4. Временная характеристика пульсирующей освещенности

E_{min} — минимальное значение амплитуды переменной составляющей освещенности, E_{cp} — среднее значение освещенности (рис. 4).

Выборки сигнала осуществляются в течение 10 мс. За это время выбираются максимальное, минимальное и среднее значения. Обработка сигнала ведется не синфазно периодам колебаний. В процессе измерения производится анализ нескольких периодов, и значения результатов выборок усредняются. В итоге значения max , min и значение среднего определяются в единицах освещенности (люксах).

После нахождения параметров сигнала по формуле (7) вычисляется значение коэффициента пульсации.

Измерители освещенности (люксметры)

Люксметры нового поколения ТКА-Люкс (рис. 5) и ТКА-ПКМ-31 являются в настоящее время самыми востребованными отечественными приборами, имеют метрологические характеристики на уровне лучших производимых в мире рабочих средств измерения. Диапазон измерения освещенности составляет 10–200 000 лк с погрешностью 6–8%.

Люксметр ТКА-Люкс/Эталон является первым российским люксметром, метрологичес-



Рис. 5. Внешний вид люксметра ТКА-Люкс

кие характеристики которого отвечают требованиям, предъявляемым к рабочим эталонам. Он предназначен для измерения освещенности в видимой области спектра 380–760 нм, создаваемой стандартными источниками оптического излучения, расположенными нормально относительно приемника.

Люксметр предназначен для практической реализации Государственной поверочной схемы для средств измерений световых величин в соответствии с ГОСТ 8.023-2000. Этот прибор по точности воспроизведения и передачи размеров единиц силы света и освещенности обеспечивает метрику прецизионных и рабочих средств измерений и отличается временной стабильностью и достоверностью. Допускаемая погрешность измерения освещенности прибором не превышает 2%.

Комбинированный прибор люксметр + яркомер ТКА-ПКМ мод.02 (рис. 6) служит для измерения освещенности в диапазоне 10–200 000 лк с погрешностью 8% и яркости самосветящихся протяженных объектов накладным способом в диапазоне 10–200 000 кд/м² с погрешностью 10%.



Рис. 6. Внешний вид люксметра-яркомера ТКА-ПКМ

Прибор отличается от традиционных яркомеров отсутствием оптических элементов (линзы, объектива) в схеме, что значительно упрощает конструкцию и удешевляет стоимость прибора при сохранении его точностных характеристик. Измерение яркости при этом производится накладным способом.

Для дистанционного определения яркости протяженных источников разработан недорогой, отвечающий современным метрологическим и техническим требованиям прибор для измерения яркости киноэкранов яркомер ТКА-ЯР (рис. 7), представляющий собой портативное, малогабаритное устройство с автономным питанием, снабженное функцией запоминания результата измерения (Hold). Наводка на измеряемый объект осуществляется с помощью лазерного прицела.



Рис. 7. Внешний вид яркомера ТКА-ЯР

Для упрощения конструкции прибора в оптической схеме был применен нефокусируемый объектив. Нерегулируемая фокусировка на некоторое постоянное расстояние повышает оперативность работы с прибором, так как исключается одна из рабочих операций. При этом не требуется вводить никаких поправок к градуировке, поскольку показания прибора пропорциональны яркости объекта независимо от расстояния.

Прибор имеет следующие технические характеристики: угол зрения 1,0–1,5°, диапазон измерения 10–2000 кд/м², спектральная коррекция 2,0%, суммарная погрешность 10,0%, расстояние до измеряемого объекта не менее 7,0 м.

Прибор для определения коэффициента пульсации источников излучения и освещенности пульсметр-люксметр ТКА-Пульс (рис. 8), обработка информации в котором осуществляется микропроцессором, имеет следующие технические характеристики: диапазон измерения коэффициента пульсации 0–100%, ди-



Рис. 8. Внешний вид пульсметра-люксметра ТКА-Пульс

апазон измерения освещенности 10–200 000 лк, погрешность измерения не превышает 10%.

УФ-радиометр ТКА-ПКМ (12),(13)

Прибор (рис. 9) предназначен для измерения облученности в области спектра:

- 200–280 нм;
- 280–315 нм;
- 315–400 нм.

Трехканальное исполнение измерительного прибора повышает оперативность измерения излучения. Погрешность прибора, определяемая коррекцией спектральной характеристики фотоприемника, имеет значение порядка 10%. Суммарная погрешность серийно выпускаемого прибора равна 17%. Величина этой погрешности зависит не только от метрологических характеристик самого прибора, но и от состояния метрологического обеспечения измерений. Рабочие эталоны в ультрафиолетовой области спектра, используемые при аттестации рабочих средств измерения, имеют, к сожалению, погрешность около 8%.

Прибор спектрального типа спектрофотокориметр ТКА-ВД предназначен для определения спектрального состава источника оптического излучения с последующим вычислением цветовых координат в выбранной системе координат.

Оптическая схема прибора представляет собой полихроматор на дифракционной решетке с регистрацией разложенного излучения фотодиодной линейкой. Рабочий спектральный диапазон прибора 380–760 нм. Диапазон линейности сигналов достигает шести порядков. В зависимости от конфигурации входного устройства прибор работает как в режиме яркомера, так и в режиме измерения освещенности. Спектральное разрешение прибора не превышает 3 нм.



Рис. 9. Общий вид УФ-радиометра ТКА-ПКМ



Рис. 10. Внешний вид спектрометра ТКА-ВД

Недостатком спектрального способа измерения являются технические трудности при использовании измерительного прибора. В то же время нужно заметить, что знание спектрального состава исследуемого источника оптического излучения позволяет решить практически все колориметрические и другие фотометрические задачи, стоящие перед исследователем. Современные методы обработки информации дают возможность смоделировать с достаточной точностью любую эффективность. Спектрометрический метод определения эффективных и интегральных радиометрических величин (колориметрия и УФ-радиометрия) позволяет решить задачу промышленного прецизионного приборостроения на основе современных полупроводниковых ФПУ (линейки, ПЗС-матрицы).

Спектро радиометр ТКА-ВД/УФ (рис. 10) позволяет получить интегральные значения УФ-И в любой заданной спектральной области, а также выполнить расчет приведения к функции любой эффективной величины (эритемной, бактерицидной и т. п.). Прибор подготовлен для аттестации в качестве рабочего эталона энергетической освещенности.

Комбинированные приборы и приборные комплексы

Одновременное измерение нескольких климатических и фотометрических параметров образует основу интегральной стратегии управления микроклиматом. В связи с этим особым достоинством приборной серии ТКА является то, что потребитель имеет возможность сам выбирать комплексы с нужной комбинацией измеряемых параметров (до 8 в одном приборе) (таблица). Большой популярностью пользуются приборные комплексы ТКА-Хранитель (температура, влажность, освещенность и УФ-И), ТКА-Климат (температура, влажность, скорость дви-

Таблица. Кодификации вариантов исполнения приборов ТКА по составу и числу измеряемых и вычисляемых параметров

Исполнение / комплектация	Освещенность	Яркость	Энергетич. освещенность (УФ) 315–400 нм	Энергетич. освещенность (УФ) 280–315 нм	Энергетич. освещенность (УФ) 280–400 нм	Энергетич. освещенность (УФ) 200–280 нм	Температура	Температура сферы	Относительная влажность	Скорость движения воздуха	Вычисляемые параметры													
											E	L	UV-A	UV-B	UV-A+B	UV-C	t	t _{сф*}	RH	V	К _п	ТНС	t _{пл}	t _{тр}
ТКА-Люкс	•																							
ТКА-ПКМ(31)	•																							
ТКА-ПКМ(02)	•	•																						
ТКА-ПКМ(06)	•																							
ТКА-ПКМ(08)	•																							
ТКА-ПКМ(12)			•	•																				
ТКА-ПКМ(12/A)			•																					
ТКА-ПКМ(12/B)				•																				
ТКА-ПКМ(12/C)																								
ТКА-ПКМ(12/A,B)																								
ТКА-ПКМ(13)			•	•																				
ТКА-ПКМ(13/C)																								
ТКА-ПКМ(20)									•	+ЧШ	•													
ТКА-ПКМ(23)									•	+ЧШ	•								•	•				
ТКА-ПКМ(24)									•	•	•							•	•	•				
ТКА-ПКМ(41)	•	•							•	+ЧШ	•													
ТКА-ПКМ(42)	•								•	+ЧШ	•													
ТКА-ПКМ(43)	•								•	+ЧШ	•													
ТКА-ПКМ(50)																								
ТКА-ПКМ(52)									•		•													
ТКА-ПКМ(60)									•	•	•								•	•				
ТКА-ПКМ(61)	•	•							•	•	•								•	•				
ТКА-ПКМ(62)	•								•	•	•								•	•				
ТКА-ПКМ(63)	•								•	•	•								•	•				
ТКА-ПКМ(65)	•	•							•	•	•								•	•				
ТКА-ПКМ(82)	•	•																						

жения воздуха), ТКА-ТНС — единственный в России прибор, который обеспечивает измерение и отображение в режиме реального времени температуры и влажности воздуха, температуры внутри черного шара, температуры влажного термометра, температуры «точки росы» и значений интегрального показателя тепловой нагрузки среды — ТНС-индекса.

Помимо решения задач в области технологических измерений, приборный парк ТКА обеспечивает измерения световых и климатических параметров в производственных помещениях и на рабочих местах. Согласно требованиям санитарных норм и правил Сан-ПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений», показательными, характеризующими качество микроклимата, являются:

1. Температура воздуха — измеряется в диапазоне $-30...+50$ °С с погрешностью $\pm 0,2$ °С. Допускается также проведение измерений температуры воздуха в диапазоне $0...+50$ °С с погрешностью $\pm 0,5$ °С.
2. Температура поверхностей — измеряется в диапазоне $0...+50$ °С с погрешностью $\pm 0,5$ °С. Для ее определения используются контактные электротермометры либо дистанционные приборы (пирометры). Для оценки усредненных величин температуры окружающих поверхностей допускается также применять зачерненные шаровые термометры с последующим расче-

том средней температуры излучения (называемой также средней радиационной температурой). При этом обычно используют зачерненные тонкостенные металлические шары диаметром не менее 90 мм со степенью черноты не менее 0,95.

3. Относительная влажность воздуха — измеряется в диапазоне от 10% до 90% с погрешностью $\pm 5\%$ относительной влажности. Для измерения температуры и относительной влажности воздуха используются психрометры и электронные термогигрометры, причем психрометры постепенно вытесняются с рынка различными типами термогигрометров в силу сложности корректной эксплуатации психрометров, что приводит к значительным погрешностям в определении значений относительной влажности воздуха.
4. Скорость движения воздуха — измеряется в диапазоне от 0,1 до 20 м/с с погрешностями $+0,05$ м/с в поддиапазоне от 0,1 до 0,5 м/с и $\pm 0,1$ м/с в поддиапазоне выше 0,5 м/с. Для измерения скорости движения воздуха используются анемометры вращательного действия — крыльчатые, вращательные. Малые скорости движения воздуха рекомендуется измерять термоанемометрами и кататермометрами, принцип действия которых заключается в определении действия охлаждающей силы воздуха на скорость изменения показаний предварительно нагретого до определенной темпе-



Рис. 11. Внешний вид термогигрометра ТКА-ПКМ-20



Рис. 12. Внешний вид термогигрометра ТКА-ПКМ-23

ратуры чувствительного элемента измерительной системы. Используются также, в незначительной степени, ультразвуковые и доплер-лазерные термоанемометры. Основной парк приборов состоит из портативных термоанемометров в микропроцессорном исполнении.

5. Интенсивность теплового излучения (облучения) — измеряется в диапазоне от 10 до 350 Вт/м² с погрешностью ± 5 Вт/м² и в диапазоне выше 350 Вт/м² с погрешностью ± 50 Вт/м². Для измерения этого параметра используются приборы, обеспечивающие угол обзора, близкий к полусфере, не менее 160° и чувствительные в инфракрасной и видимой области спектра оптического излучения: актинометры, радиометры. Возможно также использование черного шарового термометра при измерении стационарных тепловых потоков. При этом процедура заключается в измерении температуры внутри черного шара и дальнейшем вычислении значений средней температуры излучения и собственно величины интенсивности (плотности) теплового потока.

6. Для комплексной оценки воздействия на организм человека всех факторов микроклимата используется также THC (WBGT) — индекс, который определяется на основе величин температуры влажного термометра, температуры внутри черного шара и температуры воздуха. Помимо СанПиН, такой подход регламентирован в гармонизированном ГОСТ Р ИСО-7243-2007 [Расчет тепловой нагрузки на работающего человека, основанный на показателе WBGT (температура влажного шарика психрометра)], введенном в действие на территории РФ в 2008 году и все более широко применяемом в производственных условиях для оценки теплового перегрева человека в горячей окружающей среде.

Термогигрометры серии ТКА обеспечивают измерения температуры и относительной влажности воздуха, обладают высокими эксплуатационными характеристиками, имеют в своем составе прецизионные твердотельные датчики влажности и высокостабильные платиновые датчики температуры, могут комплектоваться, по отдельному заказу, черным шаром диаметром 90 мм — модель ТКА-ПКМ-20 (рис. 11), модель ТКА-ПКМ-23 (рис. 12) может комплектоваться интерфейсом для связи с внешними устройствами.

Термоанемометры серии ТКА работают в диапазоне скоростей воздуха от 0,1 до 20 м/с, построены по микропроцессорной технологии, содержат оригинальный измерительный зонд, встроенный интерфейс связи и оснащены аккумуляторной батареей в комплекте с зарядным устройством. Эти термоанемометры позволяют измерять мгновенные значения скоростей воздушного потока, а также производить усреднение показаний за период времени 100 с модели (ТКА-ПКМ-50, 52) (рис. 13).

Модель ТКА-ПКМ-24 (рис. 14) — это единственный в России прибор, который обеспечивает измерение и отображение в режиме реального времени температуры и влажности воздуха, температуры внутри черного шара, температуры влажного термометра, температуры «точки росы», значений интеграль-



Рис. 13. Общий вид термоанемометра ТКА-ПКМ-50, 52



Рис. 14. Общий вид термогидрометра ТКА-ПКМ-24

ных показателей тепловой нагрузки среды — ТНС и WBGT индексов.

В этом приборе предусмотрено также вычисление и отображение на дисплее значений средней температуры излучения и интенсивности теплового облучения. Прибор оснащен встроенным интерфейсом связи. Поставляется в комплекте с черным шаром, штативом, кабелем связи с ПК, программным обеспечением. Модель ТКА-ПКМ-65 не имеет аналогов по количеству измеряемых параметров — их в приборе 8.

Научно-калибровочный центр (НКЦ)

НКЦ предприятия «ТКА» оснащен современным, в том числе уникальным, оборудованием, которое обеспечивает проведение ка-

либровочных и поверочных (силами Ростест) работ при выпуске приборов серии «ТКА». По каждому типу приборов имеется утвержденное метрологическое обеспечение измерений и эталоны соответствующего уровня, госповерка которых ежегодно проводится в уполномоченных организациях Госстандарта РФ. Специалистами центра проводятся консультации по вопросам возможности использования приборов для решения конкретных задач и даются рекомендации по выбору соответствующих приборов. По заданию министерств, ведомств и отдельных заказчиков выполняются научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, связанные как с разработкой новых типов приборов, так и с исследованиями воздействия физических факторов на материальные объекты и изучением происходящих в связи с этим изменений. ■

Литература

1. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике. М.: Мир, 1978.
2. Планк М. Теория теплового излучения. ОНТИ, 1935.
3. Колориметрия // Публикации МКО. 1986. № 15.2.
4. Международный светотехнический словарь // Публикации МКО. 1987. № 17.4.
5. Методы измерения и спецификация цветового воспроизведения источников света // Публикации МКО. 1974. № 13.2.
6. Новаковский С. В. Цвет в цветном телевидении. М.: «Радио и связь», 1988.
7. Гуревич М. М. Цвет и его измерение. М.: Издательство АН СССР, 1950.
8. Из истории колориметрических систем (реферат работы А. Шварца «Geschichte der Farbsysteme») // Светотехника. 2003. № 1.