

# Современное состояние и перспективы развития фотометрии осветительных приборов

Р.И. СТОЛЯРЕВСКАЯ<sup>1</sup>, Е.И. РОЗОВСКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «Редакция журнала «Светотехника», Москва

<sup>2</sup> ООО «ВНИСИ им. С.И. Вавилова», Москва

<sup>1</sup>E-mail: lights-nr@inbox.ru

## Аннотация

Статья посвящена обзору материалов в части рекомендаций, методов и средств воспроизведения и передачи размеров единиц фотометрических, энергетических и фотонных величин. Рассмотрены способы воспроизведения единиц фотометрических величин и их прослеживание до основных единиц системы СИ, а также связь методов и средств передачи размеров единиц от первичных эталонов измерительным установкам испытательных центров и лабораторий и современные требования к методам и средствам испытаний осветительных приборов, используемых в системах освещения различного назначения.

**Ключевые слова:** оптическая радиометрия, фотометрия, колориметрия, спектрорадиометрический подход, детекторный подход, фотонные величины, гониофотометрия, фотояркоммер.

## 1. Введение

В последние десятилетия получили существенное развитие разработки в области создания источников света [1, 1а, 2, 2а], приёмников излучения [3, 4], измерительной техники и прецизионного приборостроения в целом [5–7]. Этот процесс идёт параллельно с развитием и внедрением квантовой технологии в метрологию [8], что обусловлено волновой природой света и лежит, практически, в основе определения канделы 1979 г.

Международный выбор в направлении квантовой технологии или фотоники требует совершенствования прослеживания и достоверности измерений не только для однофотонных, но и для мультифотонных процессов. И хотя последнее требование ещё в процессе исследований и разработки, эволюцию в воспроизведении канделы в направлении квантового подхода (например, кандела –

это сила света монохроматического источника излучения в данном направлении с частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, силой излучения, равной  $1/683$  Вт/ср и фотонной силой излучения, равной  $(683 \cdot 540 \cdot 10^{12} \cdot 6,626 \cdot 10^{-34})^{-1}$  фотон/(с · ср), можно считать своевременной, особенно с учётом того, что четыре единицы системы СИ (кг, моль, Кельвин и Ампер) переопределены в терминах физических констант с целью создания универсальной квантовой системы СИ на основе фундаментальных констант [9,10,11].

Подготовленный и официально одобренный Консультативным комитетом по фотометрии и радиометрии (ККФР) Международного комитета мер и весов (МКМВ) документ [12] является меморандумом «практического применения» в целях модернизации и расширения предыдущей версии этого документа, ограниченного реализацией канделы на основе её определения 1979 г., действующего по сей день. Фотометрия и используемые в оптической радиометрии единицы измерения тесно связаны друг с другом современным определением основной единицы системы СИ – канделы. Меморандум охватывает реализацию канделы, равно как и других единиц измерения фотометрических и радиометрических величин. Последние достижения в области генерации и использования отдельных фотонов открывают огромные возможности в части оценки потоков излучения количеством фотонов. Поэтому принятый документ дополнительно включает в себя информацию о практической реализации перехода от измерений фотометрических и радиометрических величин к измерению фотонных величин.

### 1.1. Фотометрия и радиометрия

Кандела – это основная единица для измерения фотометрической величины «сила света» в системе СИ. Опреде-

ление канделы в системе СИ устанавливает связь между фотометрическими и радиометрическими единицами. В 1979 г. на 16-ой Генеральной конференции по мерам и весам было принято следующее определение единицы силы света «кандела» [кд] [13]:

*Кандела – это сила света, излучаемая в заданном направлении источником монохроматического излучения с частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, сила излучения которого в этом направлении составляет  $1/683$  Вт/ср.*

Отсюда следует, что при измерении в системе СИ относительная спектральная световая эффективность  $K_{cd}$  монохроматического излучения с частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц в точности равна  $683$  кд·ср/Вт или лм/Вт.

Это определение сформулировано с использованием только физических терминов и только для одной частоты электромагнитного излучения. Целью фотометрии является такое измерение параметров излучения в видимой области спектра, при котором результаты измерений связаны со зрительными ощущениями, вызванными у наблюдателя именно этим излучением. Большинство источников света имеют широкий спектр частот. Поэтому Международная комиссия по освещению (МКО) определила несколько весовых функций, которые называют функциями относительной спектральной световой эффективности и которые описывают относительную спектральную чувствительность или спектр реакции среднего глаза человека при определённых условиях наблюдения. Эти функции записываются как зависимости от длины волны в стандартном воздухе (сухой воздух при  $15$  °C и  $101325$  Па, содержащий  $0,03$  объёмных% диоксида углерода), нормализованные относительно их максимумов. Определение канделы призвано связать эти функции, задав их значения на указанной частоте. Постоянная  $K_{cd}$  вместе с функцией относительной спектральной световой эффективности связывает фотометрические и радиометрические величины для формирования единой метрологической системы.

В 2007 г. МКМВ заключил соглашение с МКО, согласно которому эти две организации признали, что:

- МКМВ отвечает за определение фотометрических единиц в системе СИ;
- МКО отвечает за стандартизацию функций относительной спек-

ральной световой эффективности глаза человека.

В общем виде уравнение, связывающее заданное спектральное распределение радиометрической величины  $X_{e,\lambda}(\lambda)$  с соответствующей ей фотометрической величиной  $X_{v,x}$ , имеет вид:

$$X_{v,x} = \frac{K_{cd}}{V_x(\lambda_a)} \int_{\lambda} X_{e,\lambda}(\lambda) V_x(\lambda) \cdot d\lambda, \quad (1)$$

где  $\lambda_a = 555,017$  нм – длина волны в стандартном воздухе, которая соответствует частоте, приведённой в определении канделы, а нижний индекс «x» указывает на ту или иную функцию относительной спектральной световой эффективности МКО. Самой важной из этих связанных со зрением функций является относительная спектральная световая эффективность для адаптировавшегося к условиям дневного зрения глаза наблюдателя  $V(\lambda)$ , табулированная МКО с интервалом 1 нм для диапазона длин волн 350–830 нм. Недавно МКО стандартизировала функцию относительной спектральной световой эффективности для сумеречного зрения (*mesopic function*). Эта функция предназначена для использования при уровнях яркости, лежащих между уровнями яркости, соответствующими условиям дневного зрения, и уровнями яркости, соответствующими условиям ночного зрения (адаптации глаза в условиях ночного зрения), тем самым завершив стандартизацию связанных со зрением функций [14,15].

## 1.2. Фотометрия и фотонные величины

Фотонные величины – это характеристики оптического излучения, выраженные через известные количества фотонов или потоки фотонов. Из-за двойственной природы электромагнитного излучения, фотометрические и/или спектральные энергетические величины могут быть выражены через фотонные величины. Для длин волн в воздухе, связь между соответствующей заданной длине волны спектральной энергетической величиной  $X_{e,\lambda}(\lambda)$  и соответствующей фотонной величиной  $X_{p,\lambda}(\lambda)$  имеет вид:

$$X_{e,\lambda}(\lambda) = \frac{hc}{\lambda} \cdot n(\lambda) \cdot X_{p,\lambda}(\lambda), \quad (2)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света в вакууме,  $n(\lambda)$  – спектральный коэффициент преломления стандартного воздуха.

Совместив уравнения (1) и (2), получаем общее уравнение, связывающее фотометрическую величину  $X_{v,x}$  и соответствующую ей фотонную величину  $X_{p,\lambda}(\lambda)$ :

$$X_{v,x} = K_{p,x} \int_{\lambda} X_{p,\lambda}(\lambda) \frac{n(\lambda) V_x(\lambda)}{\lambda} d\lambda, \quad (3)$$

где

$$K_{p,x} = \frac{K_{cd} hc}{V_x(\lambda_a)}, \quad (4)$$

а  $K_{p,x}$  – коэффициент перевода фотонных величин в фотометрические для функции относительной спектральной световой эффективности  $V_x(\lambda)$ .

Фотонные величины особенно важны для характеристики осветительных приборов (ОП), работающих в области фотосинтетически активной радиации (ФАР) [16,17]. Такой подход требует знания числа фотонов, которые могут взаимодействовать с молекулами вещества, способного его воспринять. За единицу фотонного потока в области ФАР принято число фотонов, равное числу Авогадро  $N_A = 6,026 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> [18], так что поток фотонов  $\Phi_{ph}$  на длине волны  $\lambda$  в спектральном диапазоне ФАР будет равен:

$$\begin{aligned} \Phi_{ph}(\lambda) &= \frac{N_{ph}}{N_A} = \\ &= \frac{\Phi_e(\lambda)\lambda}{hc N_A}, \quad [\text{мкмоль/с}], \end{aligned} \quad (5)$$

где число фотонов  $N_{ph} = \Phi_e(\lambda) / E_{ph}(\lambda)$ , т.е. равно отношению спектрального потока излучения  $\Phi_e(\lambda)$  к энергии кванта соответствующей длины волны  $E_{ph}(\lambda) = hc/\lambda$ .

## 2. Воспроизведение канделы и производных единиц измерения радиометрических, фотометрических и фотонных величин

Так как определение канделы связывает фотометрические единицы измерения с радиометрическими, то практическая реализация фотометрических единиц почти всегда основана на практической реализации радиометрических единиц.

Обычно для реализации радиометрических единиц используются два основных метода. Это «детекторный» (*detector based*) и «основанный на источнике» (*source based*) подход, названные так в зависимости от того, что лежит в их основе: первичный эталонный приёмник или первичный эталонный источник излучения соответственно. Воспроизведение размеров единиц измерения фотонных величин, таких как поток фотонов (количество фотонов в секунду) или фотонная облучённость (количество фотонов в секунду на единицу площади) для низких уровней потоков излучения может быть осуществлено также при помощи радиометрических методов, основанных на приёмнике или источнике излучения и описывающих переход от радиометрических величин к фотонным. Однако, можно также использовать источники, которые генерируют отдельные фотоны, и в качестве основного метода реализации фотонных величин воспользоваться подсчётом фотонов. Это третий подход, который называется «фотонным» (*photon-based*). Ниже описаны наиболее распространённые в настоящее время подходы к измерению параметров оптического излучения.

**Модель абсолютного радиометра**, в которой реализован принцип электрического замещения (*Electrical Substitution Radiometer – ESR*), т.е. нагрев оптическим излучением сравнивают с нагревом замещающей излучение электрической мощностью. Этот хорошо известный метод в настоящее время наиболее часто реализуется с использованием приборов, охлаждённых до сверхнизких температур (<~20 К), при которых существенно уменьшается влияние многих источников погрешностей. Такие приборы называют «криогенными радиометрами» (*cryogenic radiometer*).

**Фотодиоды с прогнозируемой квантовой эффективностью** (*Predictable Quantum Efficient Photodiodes (PQED)*)

В основе метода лежит высокоэффективный полупроводниковый материал, имеющий малые потери в определённом спектральном диапазоне длин волн. Как правило, это кремниевый фотодиод, и использование точного метода преобразования фотонов в электроны и их регистрации прибором, позволяющие определить количество падающего оптического излу-



Рис. 1.  
Государственный  
первичный эталон  
единицы силы света  
и светового потока,  
ВНИИОФИ, Москва



чения исходя из результатов измерения генерируемого фототока. Будучи изначально основанным на принципе «самокалибровки» отдельных фотодиодов, этот подход увеличил свою значимость после появления «приёмников-ловушек (trap detector)», обеспечивающих достижения близкого к единице квантового выхода благодаря созданию ловушек излучения, формирующих отражения от нескольких фотодиодов с электрически совмещёнными выходами, [3,4,19,20].

**Абсолютный источник** – это источник, характеристику оптического излучения которого можно рассчитать на основе результатов измерений других физических параметров, например термодинамической температуры. Оптическое излучение, генерируемое любым другим источником, можно измерить посредством прямого сравнения с таким абсолютным источником. Имеются два типа источников, которые при определённых условиях можно считать абсолютными:

- Модель излучателя Планка (модель чёрного тела) (рис. 1) – Для полости с высоким коэффициентом излучения (очень близким к единице) излучаемая спектральная энергетическая яркость может быть спрогнозирована при помощи закона излу-

чения Планка исходя из термодинамической (абсолютной) температуры полости. В этом случае прослеживаемость имеет место до единицы температуры СИ – кельвина. Для многих требующих высокой точности областей применения абсолютная температура полости определяется при помощи радиометрически калиброванного приёмника со светофильтром (который называют «радиометром со светофильтром» (*filter radiometer*)), и в этом случае прослеживаемость имеет место до электрических единиц СИ. Если энергетическая яркость этого источника постоянна во всех направлениях, то воспользовавшись прецизионной апертурой, помещённой перед излучателем Планка в определённом направлении на достаточно большом расстоянии, рассчитанное значение его спектральной энергетической яркости можно преобразовать в прогнозируемую спектральную силу излучения, спектральную облучённость на заданном расстоянии или спектральное распределение потока в определённом телесном угле [21,22].

- Кольцевой накопитель электронов, генерирующий синхротронное излучение (рис. 2) – Электроны, движущиеся с релятивистскими скоростями по круговым траекториям, ге-

нерируют синхротронное излучение. При определённых условиях этот источник может считаться абсолютным, и в этом случае мощность пучка синхротронного излучения, генерируемого одним электроном, движущимся по круговой траектории с частотой  $\nu$  [ $\text{Вт}\cdot\text{рад}^{-1}$ ], может быть спрогнозирована при помощи уравнения Швингера на основе известных и измеренных значений электрических и геометрических параметров. Любое, вплоть до одного, количество электронов может быть накоплено без каких-либо изменений в форме спектра излучения. В этом случае прослеживаемость имеет место до электрических единиц и единиц длины СИ. Синхротронное излучение охватывает большой, вплоть до 12 порядков, диапазон потоков фотонов, что позволяет привести поток фотонов в соответствие с чувствительностью исследуемого приёмника [23,24].

Прослеживаемость при измерениях, основанных на воспроизведении фотонных величин, базируется на том, что определение канделы можно посредством фотометрических и радиометрических величин связать с фотонными величинами [8,25]. При этом отдельные фотоны можно генерировать при помощи, например, нелинейных материалов, а также оптических и электрических источников единичных фотонов, и подсчитывать (при помощи, например, фотоумножителей, однофотонных лавинно-пролётных диодов, сверхпроводящих нанопроволочных детекторов и датчиков фазового перехода).

Наиболее распространённый метод измерения фотометрических величин базируется на использовании образцового фотометрического приёмника, спектральная чувствительность которого точно соответствует нужной функции относительной спек-



Рис. 2. Источник синхротронного излучения BESSY II, PTB, Берлин [21]

тральной световой эффективности. Приёмник (фотометр, фотометрическая головка) имеет калиброванную по площади прецизионную диафрагму (прослеживаемость до единицы длины в системе СИ) и измеренную спектральную чувствительность (прослеживаемость до абсолютного радиометра [26]). Методом сравнения или прямыми измерениями фотометрическая единица перелаётся другим, имеющим эталонный статус, источникам света или фотометрическим головкам, которые становятся вторичными эталонными фотометрическими источниками (или приёмниками) для передачи размера соответствующей фотометрической величины. В этом случае прослеживаемость до СИ «основана на приёмнике», так что имеет место прослеживаемость до электрических единиц СИ. Этот метод обычно требует проведения дополнительных измерений спектральной чувствительности фотометра для определения качества спектральной коррекции приёмника под соответствующую функцию относительной спектральной световой эффективности МКО. Для определения качества коррекции фотометра необходимо знать относительную спектральную характеристику измеряемого источника света [27]. Если в процессе эксперимента измеряют фотонные величины, то их можно при помощи уравнения (3) преобразовать в соответствующие фотометрические величины.

Практически, все методы определения фотометрических, энергетических и фотонных параметров приводят к прослеживаемости до основных единиц системы СИ (рис. 3).

Более подробно существующие методы реализации фотометрических и радиометрических единиц измерения описаны в [8].

### 3. Оборудование испытательных лабораторий для оптических радиометрических измерений

Оснащение и метрологическое обеспечение аккредитованных испытательных лабораторий и центров в области оптической радиометрии является неотъемлемой частью современного энергоэффективного, экологичного, обеспечивающего высокое качество среды обитания освещения. Международное светотехническое сообщество уделяет большое внимание

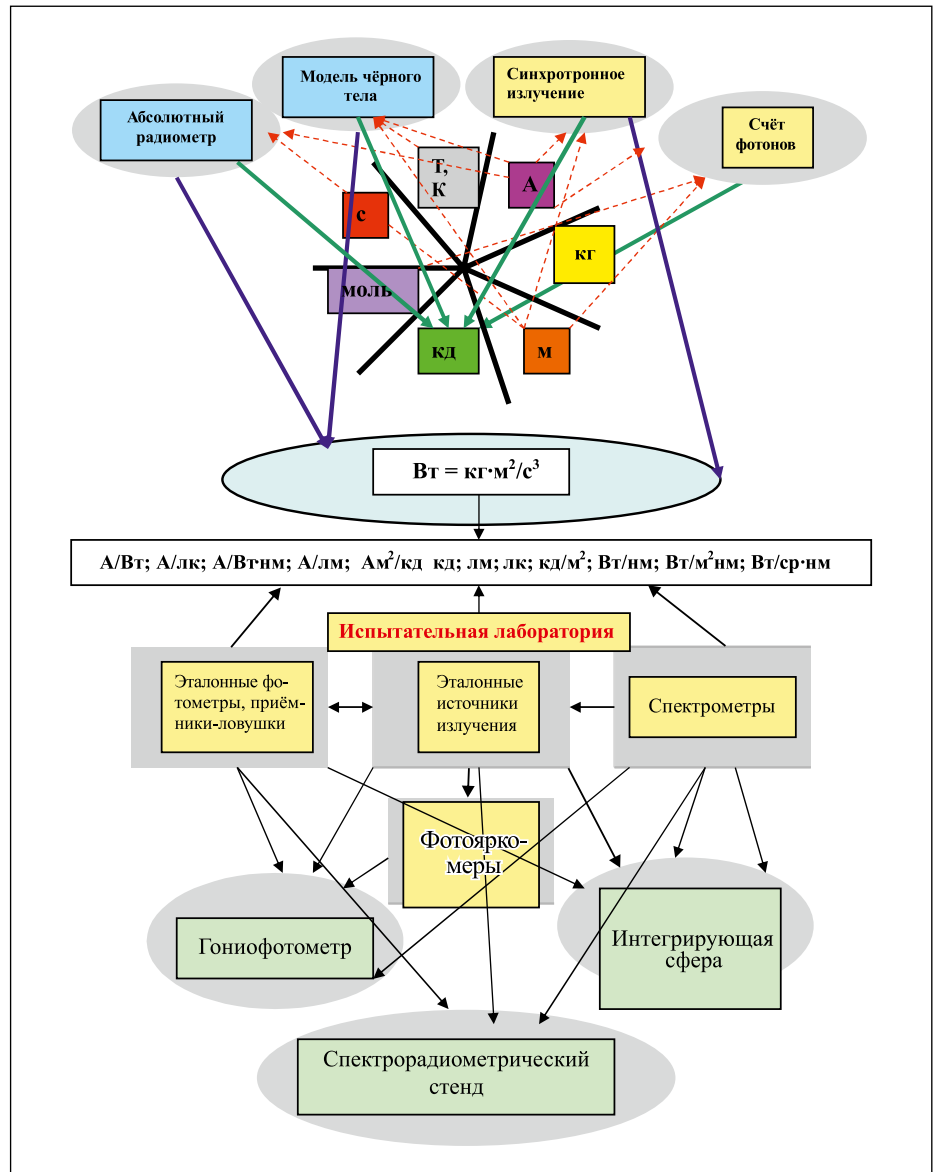


Рис. 3. Прослеживаемость к основным единицам системы СИ и передача размеров единиц от первичных и специальных эталонов оптической радиометрии некогерентного излучения измерительным комплексам испытательных лабораторий

единству измерений в части достоверной оценки параметров осветительной продукции.

С октября 2012 г. по август 2013 г. применительно к измерениям осветительных приборов со светодиодами группой международных экспертов были подготовлены и проведены в рамках специальной программы Международного энергетического агентства «IEA 4E SSL Annex» международные межлабораторные сличения IC2013, которые выявили определённые расхождения в результатах участников, обусловленные методиками измерений, используемым оборудованием и выбором критериев оценки неопределённости измерений [28, 29, 29a].

В настоящее время IEA 4E SSL Annex 2017 объявило о подготовке к новым международным сличениям испытательных лабораторий и центров в направлении гониофотометрических измерений на основе требований и методов нового стандарта МКО [30], прототипами которого являются: европейский документ EN13032-4, американский стандарт IESNA LM79, корейские стандарты KS C7653 и KS C7651 и другие международные и национальные материалы.

Новый стандарт МКО [30] предлагает следующие информационно-измерительные системы для тестирования характеристик ОП:

– комплексы с интегрирующей сферой: интегрирующая сфера с фотомет-

тром, интегрирующая сфера со спектро- радиометром;

– гониофотометрические комплексы: гониометр с фотометром (в том числе гониофотометры ближнего поля с создающими изображения фотометрами (фотояркомерами), гониометр со спектро- радиометром, гониометр с трехканальным колориметром;

– яркомеры (традиционные и фото- яркомеры);

– спектро- радиометрические установки с эталонными источниками излучения для измерения спектральных характеристик испытываемых ОП в заданных геометриях наблюдения.

Измерения устройств малых размеров, для которых не требуется определять распределение силы света (например, светодиодных ламп) проводят на комплексах с интегрирующей сферой. Измерения светильников, для которых обычно требуются данные о распределении силы света, проводят на гониофотометрических комплексах. Для определения спектральных и колориметрических характеристик применяют комплексы сфера- спектро- радиометр, гониометр- спектро- радиометр или гониометр- колориметр.

Комплекс гониометр- колориметр рекомендуется применять только для измерений относительных колориметрических характеристик. Спектро- радиометрический стенд используют для определения абсолютных спектральных характеристик источников света (ИС) и ОП и расчётов характеристик, измеренных в определённых геометриях (углах наблюдения), например, для определения параметра опасной синей яркости  $L_b$  [31, 32, 32a]. Все средства измерений, входящие в комплексы, должны быть поверены (калиброваны) с прослеживаемостью к единицам СИ.

### 3.1. Требования к интегральным фотометрам

Спектральные характеристики применяемых в установках фотометров, люксметров, фотометрических головок и яркомеров должны соответствовать функции относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения  $V(\lambda)$ , [36]. Суммарный коэффициент несоответствия коррекции  $f_1'$  (сфера фотометр, гониофотометр, люксметр) не должен превышать 3 % [27, 33, 34].

Если это требование выполняется, то коррекция спектрального несоответствия требуется только при измерениях тестируемых приборов (ТП) с цветными светодиодами. Невыполнение этого требования допускается, если коррекция спектрального несоответствия применяется при измерениях каждого ТП. В этом случае текущие значения  $f_1'$  заносят в протокол измерений. Если коррекция спектрального несоответствия не проводится, то следует оценить вклад этой погрешности в бюджет неопределённости. Если коррекция проводится, то всё равно следует учитывать вклад, связанный с качеством коррекции под  $V(\lambda)$ , в суммарный бюджет неопределённости [35].

При измерениях фотометрических характеристик в условиях ночного или сумеречного зрения рекомендуется использовать относительные спектральные световые эффективности отличные от  $V(\lambda)$  [14, 15].

### 3.2. Интегрирующая сфера

Интегрирующая сфера должна быть оборудована вспомогательной лампой для измерения самопоглощения. Самопоглощение зависит от соотношения размеров ТП и сферы, формы и размеров ТП и эталонной лампы, а также отражающих характеристик ТП и покрытия сферы.

Когда ТП устанавливается в центре сферы (4 $\pi$ -геометрия), площадь поверхности ТП должна составлять не более 2 % от площади внутренней поверхности сферы. Когда ТП устанавливается у отверстия сферы (2 $\pi$ -геометрия), диаметр отверстия не должен превышать 1/3 диаметра сферы. Когда ТП устанавливается в центре сферы, его длинная ось должна совпадать с линией, проведённой между детектором фотометрической головки и центром сферы, чтобы минимизировать размеры экрана.

Внутреннее покрытие сферы должно быть диффузным, спектрально не- селективным и не имеющим флюоресценции. Для измерений рекомендуется использовать сферы с коэффициентом отражения покрытия не менее 90 %. Держатель источника света и вспомогательное оборудование внутри сферы должны иметь как можно меньшие размеры и покрытие с максимально возможным диффузным отражением. Для обес-

печения косинусной коррекции на входное отверстие фотометрической головки или спектро- радиометра устанавливают диффузную насадку или вспомогательную сферу. Косинусная погрешность должна быть не более 15 %. Воспроизводимость измерений при закрывании и открывании сферы должна быть в пределах  $\pm 0,5$  %. Допустимое изменение чувствительности сферы между калибровками должно быть не более 0,5 %.

Калибровка интегрирующей сферы выполняется с помощью эталонной лампы светового потока, имеющей, желательно, сходное с ТП пространственное распределение силы света. Различие в распределении силы света должно учитываться в бюджете неопределённости.

#### 3.2.1. Комплекс сфера- спектро- радиометр

Комплекс сфера- спектро- радиометр следует калибровать с помощью эталона спектрального распределения полного потока излучения, имеющего прослеживаемость к единице СИ. В случае отсутствия такого эталона калибровка может быть выполнена с помощью эталонной лампы спектральной плотности облучённости и эталонной лампы полного светового потока, имеющих прослеживаемость к единице СИ. В этом случае использованный метод и связанные с ним параметры (например, угловая однородность спектрального распределения или коррелированной цветовой температуры эталонной лампы) должны быть записаны в протокол измерений. Обязательным условием является совместная калибровка комплекса сферы вместе со спектро- радиометром. Спектро- радиометр, используемый в комплексе сфера- спектро- радиометр, должен удовлетворять следующим требованиям:

– диапазон длин волн от 380 до 780 нм;

– неопределённость установки длины волны спектро- радиометром не должна превышать 0,5 нм при  $k = 2$ ;

– спектральная ширина щели и шаг сканирования не должны превышать 5 нм.

Спектро- радиометр должен иметь линейный отклик на входящее излучение на каждой длине волны видимого диапазона. Влияние нелинейности и внутреннее рассеяние света



должны учитываться в бюджете неопределённостей.

Вспомогательная лампа для измерения самопоглощения должна иметь спектр излучения в видимом диапазоне длин волн.

### 3.2.2. Комплекс сфера-фотометр

Комплекс сфера-фотометр следует калибровать с помощью эталона полного светового потока, имеющего прослеживаемость к единице СИ [37]. Эталонная лампа и ТП должны иметь похожие спектральные распределения излучения.

Комплекс сфера-фотометр должен иметь относительное спектральное распределение, соответствующее функции относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения  $V(\lambda)$  (см. также требования по п. 3.1.). При необходимости коррекции спектрального несоответствия, поправочный коэффициент (относительная активничность) вычисляют на основе данных об относительном спектральном распределении ТП и относительной спектральной чувствительности комплекса, т.е. с учётом относительной спектральной характеристики фотометрической головки и вклада относительного спектрального распределения функции сферы  $\rho(\lambda)/(1-\rho(\lambda))$ , где  $\rho(\lambda)$  – спектральный коэффициент отражения материала внутренней поверхности сферы [38].

Рекомендуется, чтобы вспомогательная лампа для измерения самопоглощения имела спектр излучения, сходный со спектром ТП, особенно при измерениях одноцветных модулей.

### 3.3. Гониофотометры

Гониофотометр должен иметь угловой диапазон сканирования, соответствующий полному телесному углу, в котором ТП излучает свет. Это особенно важно для измерений полного светового потока.

Угловая юстировка ТП должна быть проведена с точностью  $\pm 0,5^\circ$  от заданного направления. Угловой дисплей должен иметь разрешение не хуже  $0,1^\circ$ .

При измерениях пространственного распределения силы света источник излучения считается точечным. Силу

света получают из измеренной освещённости согласно закону обратных квадратов.

Для гониофотометров дальнего поля измерения проводят на следующих расстояниях:

– для ТП, имеющего близкое к косинусному (ламбертовскому) распределение (угол излучения  $\geq 90^\circ$ ) во всех  $C$ -плоскостях:  $\geq 5d$ ;

– для ТП, имеющего широкое угловое распределение, отличное от косинусного (угол излучения  $\geq 60^\circ$ ) в некоторых  $C$ -плоскостях:  $\geq 10d$ ;

– для ТП, имеющего узкое угловое распределение, высокий градиент распределения силы света, когда необходимо контролировать уровень сигнала фотометров (спектрорадиометров) от бликов отражённого света:  $\geq 15d$ ;

– для ТП, имеющего большие неосвещённые области между светящимися поверхностями:  $\geq 15(d+s)$ , где  $d$  – максимальный размер излучающей поверхности ТП, а  $s$  – наибольшее расстояние между двумя соседними светящимися поверхностями.

Для гониофотометров ближнего поля расстояние не нормируется.

Полный световой поток получают интегрированием распределения освещённости, поэтому при измерениях не обязательно использование гониофотометров дальнего поля.

Гониофотометры, имеющие мёртвую зону более  $0,1$  ср, могут использоваться для измерения полного светового потока только при условии проведения процедур коррекции.

#### 3.3.1 Комплекс гониофотометр-фотометрическая головка

Относительное спектральное распределение фотометрической головки должно соответствовать функции относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения  $V(\lambda)$ . При необходимости проводят коррекцию спектрального несоответствия по известным значениям относительного спектрального распределения излучения ТП и относительной спектральной чувствительности фотометрической головки. Коэффициент коррекции спектрального несоответствия определяют в соответствии со стандартом МКО [34].

Гониофотометр следует калибровать с помощью эталона силы света или эталона освещённости, имею-

щих прослеживаемость к единице СИ [37]. Если измеряется полный световой поток, то калибровку проводят с помощью эталона полного светового потока, имеющего прослеживаемость к единице СИ. При этом мёртвая угловая зона гониофотометра не должна влиять на результаты измерения стандартной лампы полного светового потока.

#### 3.3.2 Комплекс гониофотометр-спектрорадиометр

Комплекс гониофотометр-спектрорадиометр следует калибровать с помощью эталона спектральной плотности силы излучения или эталона спектральной плотности энергетической освещённости, имеющих прослеживаемость к единице СИ [39].

При использовании комплекса для измерений полного светового потока или полного спектрального светового потока следует проводить калибровку с помощью эталона полного спектрального светового потока, имеющего прослеживаемость к единице СИ. Мёртвая угловая зона комплекса не должна влиять на результаты измерения стандартной лампы полного спектрального светового потока.

Спектрорадиометр, используемый в комплексе гониофотометр-спектрорадиометр, должен удовлетворять следующим требованиям: диапазон длин волн от 380 до 780 нм; неопределённость определения длины волны спектрорадиометром не должна превышать  $0,5$  нм при  $k = 2$ ; спектральная ширина щели и шаг сканирования не должны превышать  $5$  нм. Спектрорадиометр должен иметь линейный отклик на входящее излучение на каждой длине волны видимого диапазона. Нелинейность и внутреннее рассеяние света должны учитываться в бюджете неопределённостей.

#### 3.3.3 Комплекс гониофотометр-колориметр

Комплекс гониофотометр-колориметр должен включать в себя трехканальные колориметрические головки для измерения координат цвета  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , которые должны иметь спектральную чувствительность, соответствующую цветовым функциям стандартов МКО. Канал  $Y$  должен также удовлетворять требованиям к комплексу гони-

офотометр-фотометрическая головка (п. 3.3.1).

Если эти условия не выполняются, то комплекс может быть использован только для измерения цветовых различий.

### 3.4. Яркометры

Для измерений могут применяться как традиционные яркометры, измеряющие яркость точек, так и фотояркометры, формирующие изображение распределения яркости поверхности. Яркометры калибруют с помощью эталона яркости, имеющего прослеживаемость к единице СИ [37].

Относительное спектральное распределение яркометра должно соответствовать функции относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения  $V(\lambda)$  [36].

При необходимости проводят коррекцию спектрального несоответствия по известным значениям относительного спектрального распределения излучения ТП и относительной спектральной чувствительности фотометра. Коэффициент коррекции спектрального несоответствия функции  $V(\lambda)$  определяют в соответствии с формулами, приведёнными в [34, 40]. При измерениях фотояркометром неопределённость измерений может быть оценена сравнением с результатами измерения распределения яркости типичного светодиодного устройства с помощью традиционного яркометра.

#### 3.4.1. Фотояркометры [41, 41а, 42]

Основным назначением цифровых формирующих изображение яркометров или фотояркометров (*imaging luminance measurement device*) является измерение проекции пространственного распределения яркости протяжённых источников и освещённых поверхностей.

Фотояркометр – это прибор, состоящий из датчика изображения (например, матрицы приборов с зарядовой связью), фотометрического корригирующего светофильтра, объектива, электронных компонентов (аналого-цифровой преобразователь, схема выборки и хранения, встроенный программный продукт обработки информации и дисплей). Приборы различаются типами калибровки.

**Фотояркометр типа I:** Только с яркостной калибровкой. Каждый из пикселей  $(i, j)$  яркостного изображения

$L(i, j)$  содержит только информацию о яркости, наблюдаемой в пределах сцены. Геометрическая информация для оценки изображения либо не нужна, либо не требуется.

**Фотояркометр типа II:** Каждый из пикселей  $(i, j)$  яркостного изображения  $L(i, j)$  содержит как значение яркости сцены, так и сопутствующую информацию о направлении  $\vartheta_c(i, j)/\varphi_c(i, j)$  и местоположении  $x_s(i, j)/y_s(i, j)$  и о видимых телесных углах  $\Delta\Omega_{Pixel}(i, j)$ . Для фотояркометров этого типа необходима как фотометрическая, так и геометрическая калибровка.

Свойства классических яркометров описаны в [34]. В случае фотояркометров следует учитывать некоторые дополнительные особенности:

- Измерения и оценки обычно производятся при помощи компьютерных программ. Перевод физического сигнала (собранных фотографий) в значения яркости может оказаться сложным, и иногда для этого используются алгоритмы обработки и сжатия изображения (например, для уменьшения объёма данных).

- Фотояркометры имеют большое количество (более или менее) независимых приёмников, которые называют пикселями. Если рассматривать систему как совокупность отдельных приёмников, то каждый из приёмников должен иметь свои собственные характеристики. Однако на практике эти пиксели совмещают (механическими средствами или математически), чтобы сформировать несколько зон измерения (зон оценки).

- Некоторые из имеющихся в продаже фотояркометров допускают лёгкую замену оптической системы (изменение фокусного расстояния, апертуры, объективов и нейтральных светофильтров). В общем случае, служащие для описания фотояркометра параметры относятся только к определённой конфигурации (фиксированное фокусное расстояние, неизменные апертуры), которую следует указывать вместе с показателями качества.

- Яркостное изображение представляет собой совокупность значений яркости  $Y(i, j)$ , измеряемых входящим в состав фотояркометра датчиком изображения с  $(N \cdot M)$  чувствительными элементами (пикселями).

- Фотояркометры следует калибровать при помощи эталонов яркости с использованием однородной светящейся ламбертовской поверхности,

размер которой существенно превышает входящее в зону оценки поле объекта. Используемый для проведения калибровки эталон яркости калибруется, как промежуточный эталон, при помощи калиброванного яркометра методом замещения (приёмник калибрует приёмник) или фотометрической головки в режиме освещённости с дополнительной прецизионной диафрагмой на светящейся поверхности эталона яркости.

- Фотояркометры также можно калибровать с использованием источника с известным спектральным распределением энергии излучения, существенно отличающимся от излучения чёрного тела (например, для цветных СД). В этом случае спектральная чувствительность средства измерения должна существенно отличаться от нуля во всём используемом спектральном диапазоне, что позволит определить коэффициент коррекции спектрального несоответствия.

- На основе результатов спектрорадиометрических измерений можно рассчитать и поправочные множители. Для этого необходимы спектральные эталоны энергетической яркости. На основе данных о калибровке этих эталонов следует рассчитать (интегральные) фотометрические величины в соответствии с их определениями. При этом следует принимать во внимание корреляцию между спектральными характеристиками этих эталонов, так как она вносит существенный вклад в неопределённость измерений.

- При расчёте неопределённости измерений следует принимать во внимание распределение силы света эталона яркости, особенно в случае больших углов поля измерения фотометра, или если метод замещения реализуется с использованием различных углов полей измерения промежуточного эталона и калибруемого яркометра.

- Фотояркометры следует регулярно калибровать через рекомендуемые производителем промежутки времени или если есть подозрения, что характеристики прибора изменились.

### 3.5. Гониофотометр ближнего поля [43]

Концепция фундаментальной феноменологической фотометрии базируется на величинах **светового потока  $\Phi$ , силы света  $I = d\Phi/dw$ , освещённости  $E = d\Phi/dA$**  применительно



к условиям выполнения (в заданном приближении) закона обратных квадратов, т.е. условиям, в которых приёмник и источник излучения можно считать точечными. В реалиях мы имеем дело с протяжёнными ИС и ОП, измерение фотометрических характеристик которых требует больших расстояний. В то же время, фундаментальная фотометрия оперирует таким понятием, как *яркость*  $L = d\Phi / d\omega dA \cos\theta$ . Яркость является характеристикой светящейся физической поверхности и не зависит от расстояния. Теория светового поля, предложенная А.А. Гершуном в начале 30-х годов прошлого столетия, и разработанный им телецентрический метод измерения силы света позволили интерпретировать понятие яркость, приписав ему бесконечно малый пространственный угол, эквивалентный геометрическому лучу.

Таким образом, элементарный конус  $d\omega$  может рассматриваться как бесконечно тонкий луч с дифференциальным сечением  $dA \cos\theta$ . Яркость  $L$  связана с силой света следующим соотношением:  $L = dI / dA \cos\theta$ , где область дифференцирования окружает точечный источник света. Аналогичным образом можно выразить яркость через освещённость:  $L = dE / d\omega \cos\theta$ , тогда выражение для освещённости  $E$  примет вид:  $E = \int_{\omega} L \cos\theta d\omega$ . Последнее выражение полезно тем, что позволяет рассчитать освещённость в точке поверхности, создаваемую протяжённым источником, если известно распределение яркости этого источника.

В природе существуют физические ИС, которые не имеют определённой светящейся поверхности, т.к. они объёмны, например, плазма, распространяющая свет из объёма. Другим примером может служить свет

неба, связанный с рассеянием солнечного излучения в атмосфере.

Применительно к объёмным источникам излучения можно говорить о яркости реальной или яркости образа (имиджа). Другими словами, можно определить яркость в данной точке пространства и в заданном направлении как световой поток, отнесённый к единице площади в данном направлении в единичном пространственном угле. Таким образом, рассматривается не светящаяся поверхность: речь идёт о световом поле вокруг наблюдателя (реального или виртуального), и используется фундаментальное представление яркости как геометрического пучка лучей для комплексного описания пространственного распределения яркости протяжённого ИС.

Теория поля Гершуна нашла своё широкое применение именно сегодня, когда трёхмерная компьютерная графика при соответствующем программном обеспечении позволяет рассчитывать освещённость в любой точке любой поверхности в трёхмерном пространстве, если известна яркость всех лучей, проходящих через эту точку [44].

Практическое применение теории Гершуна реализовано в методике определения яркости воображаемой поверхности вокруг протяжённого источника света с помощью так называемого гониофотометра ближнего поля (рис. 4), включающего в себя гониометр и фотометр – яркомер, последовательно измеряющий яркость до 250000 геометрических лучей (пространственных конусов) в любой точке пространства. Яркомер устанавливается на перемещающемся плече, которое вращается вокруг ОП в вертикальной плоскости. Сам ОП может вращаться в горизонтальной плоско-



Рис. 4. Гониофотометр ближнего поля типа RIGO 801 (ВНИСИ им. С.И. Вавилова)

сти. Видеокамера на приборах с зарядовой связью с коррекцией под относительную спектральную световую эффективность и набором линз используется в качестве яркомера. Соответствующим подбором линза камера фокусируется на светящееся тело ОП. Каждый чувствительный элемент матрицы измеряет яркость пирамидального объёма в заданном направлении. Таким образом, в состав гониофотометра ближнего поля входит фотояркомер.

### 3.6. Спектрорадиометрический измерительный комплекс

Спектрорадиометрический измерительный комплекс может базироваться на оптическом стенде, выполненном, например, с применением оптической скамьи типа ОСК 2. Спектрорадиометр, применяемый в измерительной системе, может быть на основе матрицы приборов с зарядовой связью на выходе минидиспергирующей схемы или сканирующий, с двойным монохроматором. В любом случае, спектрорадиометр играет роль компаратора в схеме сравнения спектрального распределения эталонного источника излучения и тестируемого прибора. Использование миниспектрометра позволяет реализовать экспресс методики, но уступает в точности измерений. Сканирующий спектрометр используется в задачах прецизионных абсолютных измерений спектрального распределения облучённости,

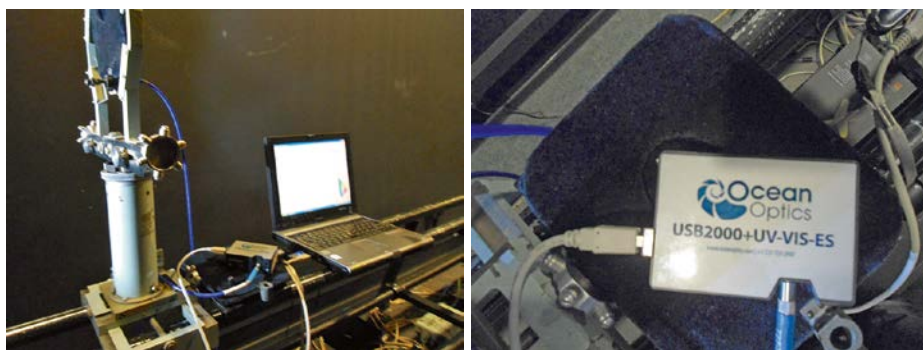


Рис. 5. Элементы спектрорадиометрического стенда с миниспектрометром (ВНИСИ им. С.И. Вавилова): слева – диффузная насадка оптического волокна на входе миниспектрометра, справа – миниспектрометр



энергетической яркости, силы излучения или потока излучения. Для сравнения с эталоном каждой из перечисленных выше величин необходимо дополнительное оборудование в виде специальных оптических систем проектирования изображения или режима освещения входной щели или входа в волоконно-оптический тракт миниспектрометра с ПЗС-матрицей на выходе (рис. 5). Единицы измерения прослеживаются до излучателя Планка, т.е. до термодинамической температуры  $T$ , К.

**Продолжение статьи будет опубликовано в одном из ближайших номеров журнала «Светотехника».**

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gerloff, T., Lindemann, M., Shirokov, S., Taddeo, M., Pendsa, S., Sperling, A. Development of a New High-Power LED Transfer Standard // *Light & Engineering*. – 2013. – No. 2. – P. 41–46.
- 1а. Герлофф Т., Линдемманн М., Пендза Ш., Шперлинг А., Таддео М., Широков С. Разработка нового мощного светодиодного эталона сравнения // *Светотехника*. – 1913. – № 4. – С. 47–50.
2. Agafonov D.R., Sapritsky V.I., Stolyarevskaya R.I., Tolstikh G.N. Luminous Intensity LED Working Gage // *Light & Engineering*. – 2000. – Vol. 8, No. 2. – P. 74–80.
- 2а. Агафонов Д.Р., Саприцкий В.И., Столяревская Р.И., Толстых Г.Н. Рабочий эталон силы света на основе светодиодов // *Светотехника*. – 2000. – № 3. – С. 9–12.
3. Sildoja, M. et al. Predictable Quantum Efficient Detector I. Photodiodes and predicted responsivity // *Metrologia*. – 2013. – Vol. 50. – P. 385–394.
4. Muller I. et al. Predictable Quantum Efficient Detector II. Characterization Results // *Metrologia*. – 2013. – Vol. 50. – P. 395–401.
5. Krueger, U. 2001. Technological aspect of the spectral correction adjustment of space-resolved radiation detectors // *Light & Engineering*. – 2001. – Vol. 9, No. 3. – P. 61–71.
- 5а. Крюгер У. Спектральная корректировка матричных приёмников излучения // *Светотехника*. – 2001. – № 4. – С. 16–20.
6. Weißhaar J.P. Next Generation Goniophotometry // *Light & Engineering*. – 2015. – Vol. 23, No. 4. – P. 75–80.
- 6а. Вайсхаар Ю.П. Гониофотометрия следующего поколения // *Светотехника*. – 2015. – № 5. – С. 23–27.
7. URL: <http://www.instrumentsystems.com>. (дата обращения 24.01.2017).
8. Zwinkels, J.C., Ikonen, E., Fox, N.P., Ulm, G., Rastello, M.L. Photometry, radiometry and «the candela»: evolution in the classical and quantum world // *Metrologia*. – 2010. – Vol. 47, No. 5. – P. 15–32.
9. Petsky, B.W. The Atomic Units, the Kilogram and the Other Proposed Changes to the SI // *Metrologia*, 2007, V44, #1, pp.69–72.
10. Mills, I. M., Mohr, P.J., Quinn, T.J., Taylor, B. N., Williams, E.R. Redefinition of the Kilogram, Ampere, Kelvin and Mole: A Proposed Approach to Implementing CIPM Recommendation 1 (CI-2005) // *Metrologia*. – 2006. – Vol. 43, No. 3. – P. 227–246.
11. Mills, I.M., Mohr, P.J., Quinn, T.J., Taylor, B.N., Williams, E.R. Redefinition of the Kilogram: A Decision Whose Time Has Come // *Metrologia*. – 2005. – Vol. 42, No. 2. – P. 71–80.
12. BIPM SI Brochure, Appendix 2. «*Mise en pratique* for the definition of the candela and associated derived units for photometric and radiometric quantities in the International System of Units (SI)», CCPR (BIPM), 2015.
13. BIPM SI Brochure: The International System of Units (SI), 8<sup>th</sup> edition, 2006; updated in 2014, Bureau International des Poids et Mesures, F-92310 Sevres, France.
14. CIE TN004:2016 The Use of Terms and Units in Photometry – Implementation of the CIE System for Mesopic Photometry.
15. CIE TN «Interim Recommendation for Practical Application of the CIE System for Mesopic Photometry in Outdoor Lighting». Enquiry Draft, 2017.
16. Кузьмин В.Н., Николаев С.Е. Методы и приборы для оперативной оценки энергоэффективности оптического излучения в условиях светокультуры // *Светотехника*. – 2016. – № 4. – С. 41–43.
17. Kuzmin, V.N., Nikolaev, S.E. Methods and Devices for Quick Evaluation of Optical Radiation Energy Efficiency // *Light & Engineering*. – 2016. – No. 4. – P. 103–104.
18. Кхан Т.К., Шпентьес Н., Эльце Т. Предложения по оценке излучения, физиологически активного для растений // *Светотехника*. – 2003. – № 1. – С. 40–41.
19. Fox, N.P. Radiometry with cryogenic radiometers and semiconductor photodiodes // *Metrologia*. – 1995. – Vol. 32, No. 6. – P. 535–544.
20. Gardner, J.L. A Four-element Transmission Trap Detector // *Metrologia*. – 1995. – Vol. 32, No. 6 – P. 411–418.
21. Sapritsky, V.I. Black-body Radiometry // *Metrologia*. – 1995. – Vol. 32, No. 6. – P. 411–418.
22. Sapritsky, V.I., Stolyarevskaya, R.I. Realization of the Lumen on the Basis of a Large-aperture High Temperature Black Body // *Metrologia*. – 1995. – Vol. 32, No. 6. – P. 455–458.
23. Klein, R. Validation of the Probability Density Function for the Calculated Radiant Power of Synchrotron Radiation According to the Schwinger Formalism // *Metrologia*. – 2016. – Vol. 53, No. 3. – P. 927–932.
24. Аневский С.И., Золотаревский Ю.М., Крутиков В.Н., Минаева О.А., Минаев Р.В., Сеннин Д.С. Развитие методов воспроизведения и передачи единиц спектрорадиометрии с использованием синхротронного излучения // *Измерительная техника*. – 2015. – № 3. – С. 31–33.
25. Castelletto, S., Godone, A., Novero, C., Rastello, M.L. Biphoton Fields for Quantum-efficiency Measurements // *Metrologia*. – 1995. – Vol. 32, No. 6. – P. 501–504.
26. Гаврилов В.Р., Дунаев А.Ю., Морозова С.П., Отрясов Д.А., Саприцкий В.И., Хлевной Б.Б. Государственный первичный эталон абсолютной спектральной чувствительности в диапазоне длин волн от 0,25 до 14,00 мкм // *Измерительная техника*, 2015, № 11, тр. 15–17.
27. CIE210: 2014 Photometry Using V( $\lambda$ )-corrected Detectors as Reference and Transfer Standards.
28. «Solid State Lighting Annex 2013 Interlaboratory Comparison Final Report». 10.09.2014 // [http://ssl.ica4.e.org/files/otherfiles/0000/0067/IC2013\\_Final\\_Report\\_final\\_10.09.2014\\_a.pdf](http://ssl.ica4.e.org/files/otherfiles/0000/0067/IC2013_Final_Report_final_10.09.2014_a.pdf).
29. Bartsev, A.A., Belyaev, R.I., Stolyarevskaya, R.I. International Interlaboratory Comparison IC2013 Experience and Participation Results of the VNISI Testing Centre // *Light & Engineering*. – 2015. – Vol. 23, No. 3. – P. 55–64.
- 29а. А.А. Барцев, Р.И. Беляев, Р.И., Столяревская. Международные межлабораторные сличения-2013 (IC2013). Опыт и результаты участия ИЦ ВНИСИ // *Светотехника*. – 2015. – № 5. – С. 35–41.
30. CIE S025/E:2015: Test Method for LED Lamps, LED Luminaires and LED Modules.
31. CIE S009 / E:2002 / IEC62471:2006 Photobiological Safety of Lamps and Lamp Systems.
32. Bartsev, A.A., Belyaev, R.I., Stolyarevskaya, R.I. Methodology of LED Luminaire BLH Radiance Measurements // *Light & Engineering*, 2013, #1, pp.53–59.
- 32а. Барцев А.А., Беляев Р.И., Столяревская Р.И. Метод измерения физиологически эффективной яркости опасного синего излучения осветительных приборов // *Светотехника*. – 2013. – № 2. – С. 25–29.
33. CIE202:2011 Spectral Responsivity Measurement of Detectors, Radiometers, and Photometers.
34. ISO/CIE19476:2011(E) Characterisation of the Performance of Illuminance Meters and Luminance Meters.
35. CIE198:2011 Determination of Measurement Uncertainties in Photometry.
36. ГОСТ Р 8.332–78 ГСИ, Световые измерения. Значения относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения.
37. ГОСТ Р 8.023 ГСИ, Государственная поверочная схема для средств измерений световых величин непрерывного и импульсного излучений.
38. IESNA LM-78, 2007. «IESNA Approved Method for Total Luminous Flux Measurement of Lamps Using an Integrating Sphere Photometer».
39. ГОСТ Р 8–195 ГСИ Государственная поверочная схема для средств измерений спектральной плотности энергетической яркости, спектральной плотности силы излучения и спектральной плотности энергетической освещённости в диапазоне длин волн от 0,25 до 25,00 мкм; силы излучения и энергетической освещённости в диапазоне длин волн от 0,2 до 25,0 мкм.

40. ГОСТ Р 8.850 ГСИ Характеристики люксметров и яркометров, 2013.

41. Krüger, U., Ruggaber, B., Schmidt, F. Spectral Properties of Imaging Luminance Measuring Devices Considering the Angular Dependence of the Spectral Transmission of Filters // Light & Engineering. – 2012. – No. 2. – P. 72–77.

41а. У. Крюгер, Б. Руггабер, Ф. Шмидт. Спектральные характеристики яркометров на ПЗС с учётом спектральных коэффициентов пропускания светофильтров // Светотехника. – 2012. – № 1. – С. 46–50.

42. CIE Draft 2.55, NC2–59, WD03: Characterization of Imaging Luminance Measurement Devices (ILMDS).

43. CIE, TC2–62: Imaging-Photometer-Based Near-Field Goniophotometry, 2009, Draft WD00.

44. Будаков В.П., Смирнов П.А. Луч Света в Теории Светового Поля. Математическое Моделирование Световых Полей. М.: Издательство МЭИ, 2016.

45. ISO/IEC GUIDE98–4.

46. CIE121–1996. The Photometry and Goniophotometry of Luminaires.

47. CIE13.3.:1995. Method of Measuring and Specifying Colour Rendering of Light Sources.

48. CIE15:2004. Colorimetry, 3<sup>rd</sup> Edition.

49. CIE TN001:2014.

50. CIE198:2011. Determination of Measurement Uncertainties in Photometry.

51. CIE198:2011. Determination of Measurement Uncertainties in Photometry – Supplement1: Modules and Examples for the Determination of Measurement Uncertainties.



**Столяревская Раиса Иосифовна**, доктор техн. наук. Окончила в 1968 г. физический факультет Казанского государственного университета. Зам. главного редактора журнала «Светотехника» и научный редактор англоязычной версии журнала «Light & Engineering».

Представитель Российского национального комитета МКО в Отделении 2 МКО



**Розовский Евгений Исаакович**, к.т.н. (1984 г.). Окончил МЭИ в 1971 г. Ведущий научный сотрудник ООО «ВНИСИ им. С.И. Вавилова». Старший научный редактор журнала «Светотехника». Эксперт от РФ в ТК 34 МЭК «Источники света и сопутствующее оборудование»

Представитель Российского национального комитета МКО в Отделении 2 МКО