

Фотометрия осветительных приборов со светодиодами¹

Э. БЕРГЕН

Компания *Photometric Solutions International Pty Ltd*, Мельбурн, Австралия
E-mail: tonyb@photometricsolutions.com

Аннотация

Светодиоды (СД) резко изменили наш подход к освещению. Они динамичны, универсальны и красочны. Их свет легко регулировать и модулировать, они прочны, долговечны и в различных сочетаниях позволяют как реализовывать живописные и интересные конфигурации, так и формировать захватывающие и жизнерадостные освещённые сцены.

При этом они могут создавать проблемы в части измерений и стандартизации. Не все эти проблемы являются новыми или необычными, но с появлением СД они стали более важными или очевидными и требующими более тщательного рассмотрения. В статье освещается ряд вопросов, с которыми фотометрические лаборатории сталкиваются при испытаниях осветительных приборов с СД, и подчёркивается важность стандартизации.

Ключевые слова: фотометрия, фотометрия СД, стандартизация СД.

1. Погрешности, обусловленные спектральной коррекцией

На рис. 1 приведена функция $V(\lambda)$, представляющая собой спектральную световую эффективность для дневного зрения. Эта функция лежит в основе всей фотометрии, т.к. она говорит о том, как наши глаза воспринимают свет, и чувствительности фотоприёмников, таких как люксметры и яркометры, должны соответствовать этой функции. Кроме того, на рис. 1 приведён спектр излучения лампы накаливания (теплового источника излучения с цветовой температурой 2856 К), который характерен для источников света, используемых для калибровки фотометров.

Однако спектры светодиодных (СД) ламп сильно отличаются от спектра используемого для калибров-

ки источника света. Т.к. спектральная чувствительность фотометра никогда не совпадает в точности с идеальной функцией $V(\lambda)$, то это приводит к по-

Рис. 1. Кривая $V(\lambda)$, на которой основана фотометрия, и спектр лампы накаливания, обычно используемой для калибровки фотометров

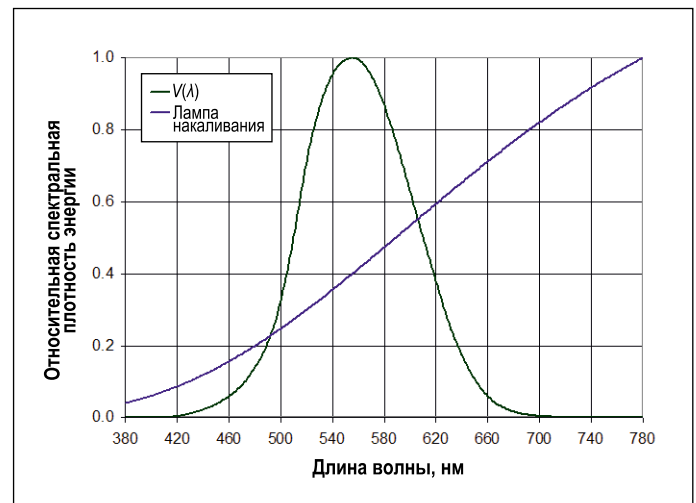
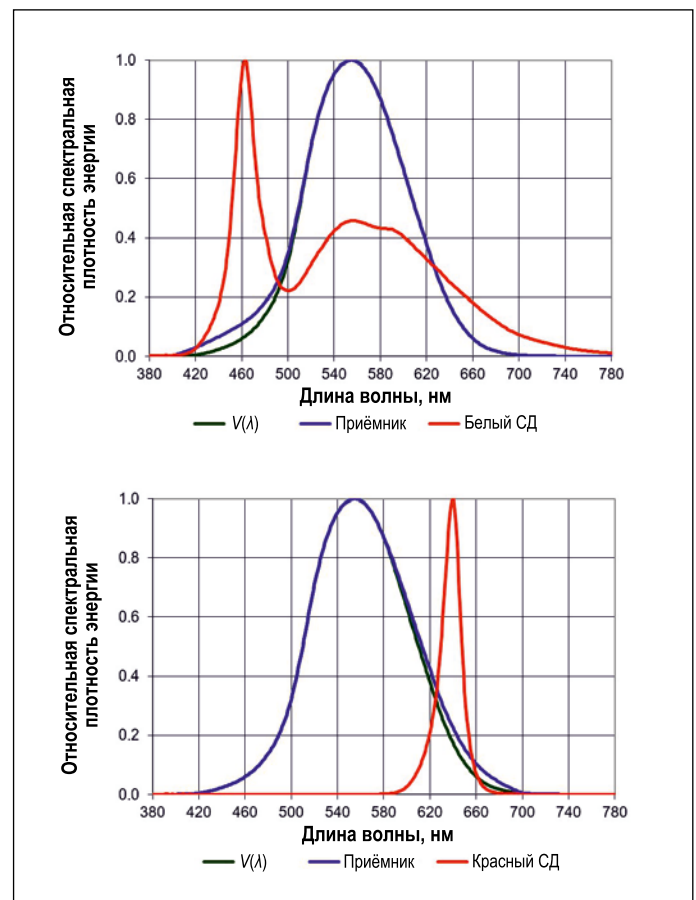


Рис. 1. Кривая $V(\lambda)$, на которой основана фотометрия, и спектр лампы накаливания, обычно используемой для калибровки фотометров



грешностям измерений, которые называют погрешностями спектральной коррекции. Величина такой погрешности зависит от спектральной чувствительности приёмника и спектра измеряемого источника света.

На рис. 2 слева приведены функция $V(\lambda)$ (зелёная линия), спектральная чувствительность гипотетического приёмника, плохо коррелированного в синей области спектра (синяя линия) и спектр СД холодного-белого света (красная линия). Хотя спектры и не согласованы в синей области,

¹ Перевод с англ. Е.И. Розовского

в которой имеет место большой пик излучения СД, значения функции $V(\lambda)$ в этой области малы, и вклад синей составляющей в значения световых величин гораздо ниже вклада более длинноволнового излучения (примерно 1/17), что уменьшает погрешность, так что в этом случае погрешность измерений будет равна примерно 3 %. На рис. 2 справа показан ещё один гипотетический приёмник, который плохо коррелирован в красной области спектра. В этом случае большая часть спектра излучения сосредоточена в области, в которой приёмник плохо коррелирован под функцию $V(\lambda)$, и в этом случае погрешность измерений будет равна примерно 20 %. Этот пример говорит о том, что для цветных СД спектральное несоответствие имеет гораздо большее значение, чем для белых СД, однако для обеспечения высокого качества измерений мы должны это учитывать и вводить, по возможности, поправки и при измерениях белых СД.

Дополнительная информация о калибровке фотометров, включая определения погрешностей, связанных со спектральным несоответствием, содержится в [1]. В [2] предлагается основанный на значениях характеристики f_1' фотометра метод определения возможного максимального значения подобной погрешности, которая может иметь место при измерениях белых СД.

2. Источники света с широтно-импульсной модуляцией

Для питания СД источников света часто используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ), позво-

Рис. 3 Зависимость мгновенного значения силы света от времени для фонаря с СД с двумя режимами работы

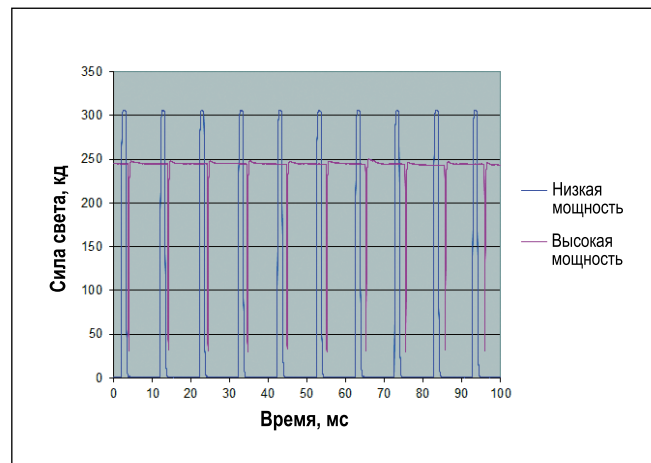


Таблица 1

Сводка результатов измерений фонаря с СД, соответствующих рис. 3

Параметр	Режим низкой мощности	Режим высокой мощности
Пиковая сила света, кд	306	247
Режим работы, %	13,1	98,2
Световая энергия за время 100 мс, кд·с*	3,94	24,0

* Обычно световая энергия (*luminous energy*) измеряется в лм·с (CIE S017/E:2011 «International Lighting Vocabulary», термин 17–733). – Прим. пер.

ляющая осуществлять управление их тепловыми режимами и светорегулирование. Это очень полезно для проектировщиков освещения, но способно усложнить жизнь фотометристов. ШИМ приводит к тому, что источник света быстро включается и выключается много раз в секунду, и тем самым, в зависимости от коэффициента заполнения, мгновенное значение силы света значительную часть времени может быть равным нулю. Это существенно сказывается на стабиль-

ности проводимых измерений, если их временной режим был выбран недостаточно тщательно (см., например, приведённую на рис. 3 зависимость от времени силы света фонаря с СД, имеющего два режима работы).

Если фонарь работает в режиме низкой мощности, то его пиковое значение силы света на самом деле выше, чем при работе в режиме высокой мощности. Это, скорее всего, связано с тепловым режимом: в режиме низкой мощности световой поток из-

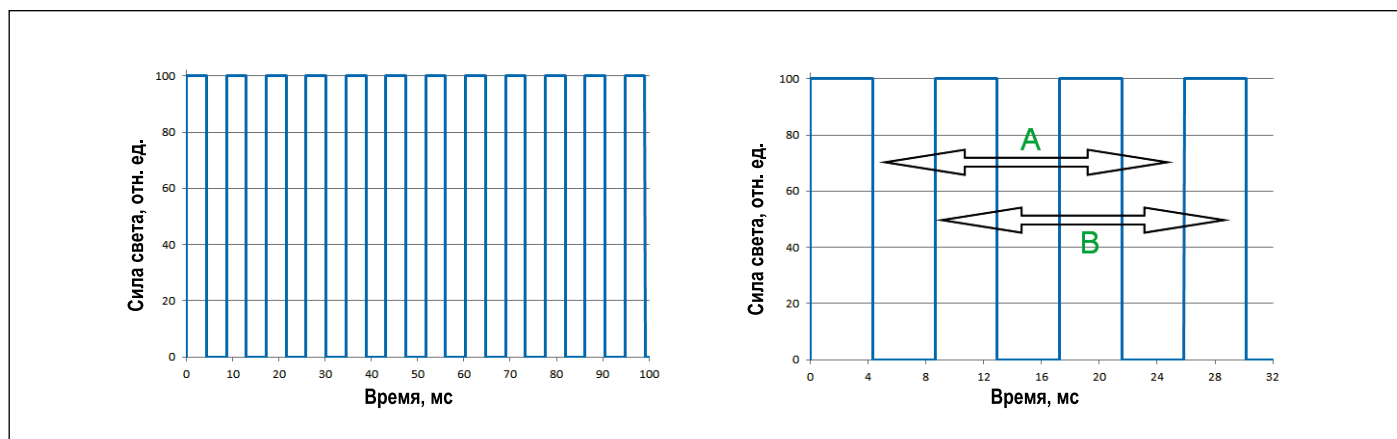


Рис. 4. Гипотетический источник света с широтно-импульсной модуляцией с частотой 116 Гц, максимальной силой света 100 кд и коэффициентом заполнения 50 % (слева) и результаты двух измерений этого источника света при разных моментах зажигания (справа)

Результаты измерений гипотетического источника света, соответствующих левой части рис. 4

Время измерения, мс	Результаты измерений, кд
0–20	56,9
20–40	50,9
40–60	43,1
60–80	55,1
80–100	52,7

лучается в течение небольших промежутков времени и падает до нуля в остальное время. Результаты измерений, соответствующие этим двум режимам работы, приведены в табл. 1.

Как следует из табл. 1, даже несмотря на то, что при работе в режиме нозкой мощности пиковое значение силы света на 24 % больше, чем при работе в режиме высокой мощности, из-за малого коэффициента заполнения количество излучаемой световой энергии в первом случае меньше. Если усреднить данные в пределах 100-мс временного интервала, то можно заметить, что световая энергия, излучаемая в режиме высокой мощности, примерно в шесть раз больше, чем световая энергия, излучаемая в режиме низкой мощности, вследствие чего в режиме высокой мощности источник света воспринимается как более яркий.

Фотометры обычно предназначены для измерения света в течение про-

межутков времени (время интегрирования), являющихся целыми кратными периодами напряжения сети питания. Так что при частоте сети 50 Гц время измерения будет равно 20, 40 или 60 мс и т.д. Представьте, что фотометр с временем интегрирования 20 мс используется для измерения гипотетического источника света с частотой ШИМ 116 Гц (период = 8,62 мс), амплитудой силы света 100 кд и коэффициентом заполнения 50 % (рис. 4, слева).

В правой части рис. 4 приведено расширенное изображение соответствующего зажигания участка левой части рис. 4, а также два результата измерений, проведенных с временем интегрирования 20 мс для разных моментов зажигания. В варианте *A* будут измерены два полных импульса, тогда как в варианте *B* будут измерены 2,6 импульса, и полученное в результате значение будет на 30 % выше, и это несмотря на то, что изме-

ряется один и тот же источник света. Анализ можно продолжить, разделив пример, приведенный в левой части рис. 4, на 5 отдельных периодов длительностью 20 мс каждый (табл. 2).

Среднее значение данных, приведенных в табл. 2, соответствующее результатам одного измерения продолжительностью 100 мс, равно 51,7 кд. Истинная (долгосрочная) средняя сила света должна быть равна 50 кд (100 кд при коэффициенте заполнения 50 %), так что даже при измерениях в течение 100 мс погрешность составляет 3,4 %.

В этом случае правильным было бы подобрать время интегрирования так, чтобы оно соответствовало периоду питания измеряемого источника света. Если время интегрирования фотометра можно было бы выбрать равным 8,62; 17,24 или 34,48 мс и т.д., то это обеспечило бы правильную для этого источника света выборку. Частота ШИМ часто неизвестна, так что оптимальное время интегрирования следует определять экспериментально, регулируя время интегрирования до тех пор, пока колебания результатов измерений будут сведены к минимуму.

3. Направленность СД источников света

Измерение распределения силы света при помощи гониофотометров дальнего поля проводятся в предположении, что размеры светильника «малы» по сравнению с расстоянием измерения. Имеются рекомендации по выбору расстояния измерения: например, согласно [3] это расстояние должно быть не менее чем в 15 раз больше максимального размера излучающего свет участка светильника (это называют правилом 15:1 (*15:1 rule*)), однако эта величина может быть уменьшена до «в 5 раз больше параллельного оси лампы размера излучающего свет участка» в случае источников света с почти ламбертовским (косинусным) распределением (правило 5:1).

Однако в [4] было показано, что даже при выполнении этих рекомендаций по выбору расстояния измерения, измерения светильников с СД, включающих в себя отдельные СД, СД модули или СД матрицы, разделённые большими не излучающими

Рис. 5. Модель дорожного светильника, состоящего из отдельных СД модулей

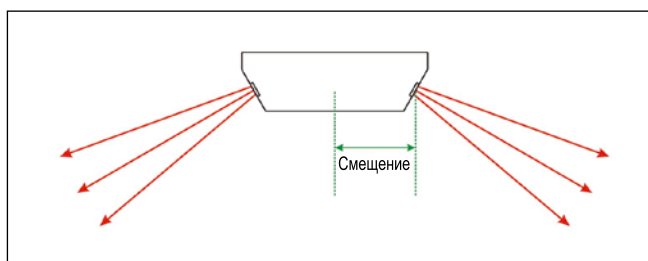
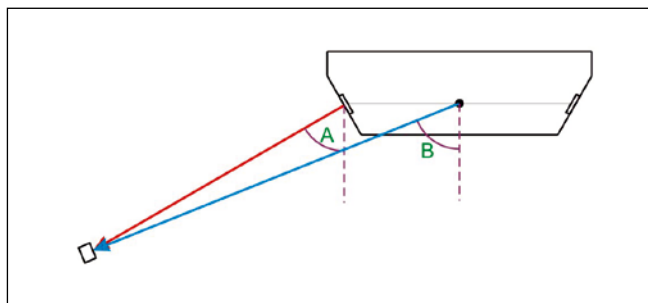


Рис. 6. Модель дорожного светильника, демонстрирующая некорректное определение угла прямого выхода светового потока или угла выхода центрального луча



свет участками, может сопровождаться значительными погрешностями. Рассмотрим модель уличного светильника (рис. 5). Это может восприниматься как крайний случай, однако автору встречались похожие уличные светильники, содержащие отдельные СД модули, которые позволяли получить узконаправленные пучки лучей в нужных направлениях.

При измерении на гониофотометре, этот светильник будет установлен таким образом, чтобы его фотометрический центр совпадал с точкой отсчёта гониометра. Однако если гониофотометром измеряют часть пучка лучей в направлении, которое обозначено на рис. 5 стрелками, то свет явно поступает из точек, расположенных к приёмнику ближе, чем точка отсчёта гониометра. Это может привести к погрешностям измерений, которые увеличиваются по мере уменьшения расстояния измерения, но даже при использовании правила 15:1 в случае дорожного светильника с меридиональным углом центрального луча 60° погрешность измерения пиковой силы света может достигать 6,1 % [4].

Возможны и дополнительные погрешности, связанные с определением угла прямого выхода светового потока или угла выхода центрального луча светильника (рис. 6). Угол прямого выхода светового потока обозначен на рис. 6, как A , однако гониометр будет измерять его, как угол B . Хотя рис. 6 является явным преувеличением из-за чрезвычайно близкого местоположения приёмника, встречающиеся на практике погрешности тоже могут оказаться значительными: при использовании правила 15:1 погрешность определения меридионального угла центрального луча может достигать $0,96^\circ$ [4].

В [4] была предложена идея использования подхода « $D + S$ » при определении минимального расстояния измерения, когда максимальная ширина не излучающего свет участка S прибавляют к размеру излучающего свет участка D . В случаях изображённых на рис. 5 и 6 моделей светильников размер не излучающего свет участка S примерно равен полной ширине излучающего свет участка D , что приводит к практически двукратному увеличению расстояния измерения. Подход « $D + S$ » включён в требования стандарта

Рис. 7. Пример того, как коррелированная цветовая температура СД лампы может изменяться в зависимости от угла относительно оси лампы

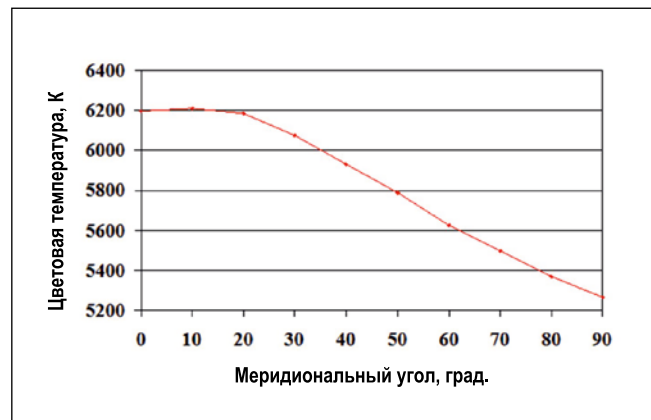
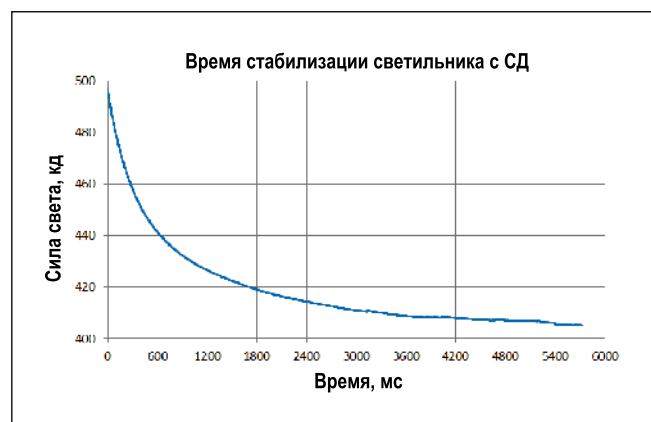


Рис. 8. Уменьшение силы света осветительного прибора с СД по мере его разогрева



[5] к расстоянию гониофотометрических измерений.

4. Угловая зависимость цвета

Традиционные источники света, такие как люминесцентные лампы и разрядные лампы высокого давления, а также светильники с такими лампами, излучают свет, цветовые характеристики которого обычно практически не зависят от угла излучения. Это означает, что в помещении с многочисленными светильниками с лампами одного и того же типа или на дороге, освещённой светильниками с лампами одного и того же типа, цвет излучаемого светильниками света будет достаточно неизменным. Но это не всегда справедливо в случае белых СД, так как несмотря на достигнутые в последние годы успехи свет СД лампы или светильники с СД может сильно зависеть от угла, так что глаз часто может заметить изменение цвета при восприятии комнаты, освещённой осветительными приборами с СД. Пример того, как коррелированная цветовая температура СД лампы может изменяться в зависимости от угла относительно оси лампы, приведён на рис. 7.

Эта угловая зависимость цвета означает, что теперь координаты цветности излучения изделий с СД следует измерять под разными углами, с тем чтобы определить пространственную равномерность цвета. В результате гониофотометры получили более широкое распространение, и теперь стандартной практикой является оснащение гониофотометра не только фотометром, но и спектрорадиометром. Методы определения пространственной равномерности цвета содержатся, например, в [5, 6], причём следует отметить, что метод, который приведён в [5], является более строгим (более правильным), чем приведённый в [6] метод.

5. Термические эффекты

Устройства с СД чувствительны к температуре, т.е. их световые характеристики зависят от температуры прибора. После включения прибора его температура возрастает до момента стабилизации, и по мере увеличения температуры световой поток прибора обычно уменьшается. Соответствующий пример приведён на рис. 8, где прибору с СД требуется для стабилизации более полутора ча-

сов, и его сила света уменьшается за это время на, примерно, 20 %.

Поэтому важно точно знать условия стабилизации прибора и учитывать их при измерении осветительных приборов с СД. Согласно [5], СД лампу или светильник с СД можно считать стабилизировавшимся, если:

- Прибор проработал не менее чем 30 мин и
- За последние 15 мин световой поток прибора изменился не более чем на 0,5 %, и
- За последние 15 мин потребляемая прибором мощность изменилась не более чем на 0,5 %.

Однако помимо времени стабилизации имеются и другие факторы, которые влияют на световой поток прибора и которые следует учитывать:

- Температура окружающего воздуха, которая должна быть в нормируемых пределах.
- Воздушные потоки, создаваемые системами кондиционирования воздуха, сквозняками или самим перемещаемым гониофотометром прибором.
- Теплопроводность, обусловленная наличием патронов или других установочных изделий, которые соприкасаются с прибором и отводят от него тепло.

6. Абсолютная фотометрия

Светильники, в которых используются традиционные источники света, такие как люминесцентные лампы, разрядные лампы высокого давления и другие стандартизированные заменяемые источники света, обычно измеряют методами относительной фотометрии. В этом случае значения силы света предварительно относят к световому потоку установленных в светильнике ламп и сохраняют в канделах на равный 1000 лм световой поток самих ламп. Достоинством такого подхода является то, что проектировщик освещения или архитектор может использовать относительные данные, соответствующие тому типу ламп, который он собирается применить в проектируемой осветительной установке, и затем посредством масштабирования этих относительных данных определить, что же будет иметь место в реальной установке.

Однако в неразборных светильниках с СД заменяемые источники света не используются – такие светиль-

ники снимают и заменяют в конце их срока службы. СД модуль не всегда можно извлечь (или извлечь достаточно аккуратно) для проведения относительных фотометрических измерений. Но это и не требуется, так как измеренный в лаборатории светильник будет (по крайней мере, формально) таким же, как и светильник, установленный в помещении, на дороге, на стадионе и т.д. Поэтому измерения светильников с СД обычно проводятся с использованием абсолютной фотометрии, и сообщаемые результаты – это те данные, которые были получены в лаборатории. Большинство лабораторий имеет оборудование, позволяющее производить абсолютные измерения, так что это не обязательно затрудняет проведение измерений.

Следует также отметить, что в этих случаях КПД светильника равен 100 %!

7. Потребность в стандартизации

Исторически сложилось так, что в различных частях света были разработаны разные методы испытаний осветительных приборов с СД. Это препятствует торговле и затрудняет проведение сличений, так как результаты измерений, проведённых в соответствии со стандартами одного региона, не всегда можно непосредственно сравнить с результатами измерений, проведённых в соответствии со стандартами другого региона.

Международная комиссия по освещению (МКО) представляет собой независимую некоммерческую организацию, которую Международная организация по стандартизации (ИСО) и Международная электротехническая комиссия (МЭК) признают в качестве международной организации по стандартизации в области света и освещения. В 2011 г. МКО сформировала технический комитет TC2-71 «Стандарты МКО на методы испытаний СД ламп, СД модулей и светильников с СД», задачей которого была разработка стандартных методов фотометрических, колориметрических и электротехнических измерений осветительных приборов с СД. Этот комитет является действительно международным, так как включает в себя 37 представителей из 16-ти стран всех 5-ти континентов.

Результатом работы этого комитета явилась публикация стандарта *S025/E:2015* «Методы испытаний СД ламп, СД модулей и светильников с СД» [5]. *S025* содержит унифицированный метод испытаний, обеспечивающий гармонизацию испытаний изделий с СД. Национальным и региональным организациям по стандартизации и контрольно-надзорным органам рекомендуется принять *S025* и использовать этот стандарт для проведения измерений приборов с СД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ISO/CIE19476:2014(E). Characterization of the Performance of Illuminance Meters and Luminance Meters.
2. Krüger, U., Blattner, P. Spectral mismatch correction factor estimation for white LED spectra based on the photometer's f_1' value // CIE x038:2013 Proc. of the CIE Centenary Conference «Towards a New Century of Light», Paris, 2013.
3. CIE121-1996. The Photometry and Goniophotometry of Luminaires.
4. Bergen, A.S.J., Jenkins, S.E. Determining the minimum test distance in the goniophotometry of LED luminaires // CIE x037:2012 Proc. of CIE2012 «Lighting Quality and Energy Efficiency», 2012.
5. CIE S025/E:2015. Test Method for LED Lamps, LED Luminaires and LED Modules.
6. IESNA LM-79-08. Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products.



Энтони Берген (Тони Берген).

Физик с более чем 20-летним опытом работы в области фотометрии и радиометрии с упором на гониофотометрию, спектрора-

диометрию, лабораторные исследования и погрешности измерений. Технический директор компании Photometric Solutions International, Австралия. Секретарь отделения 2 МКО, президент австралийского регионального комитета МКО, представитель Австралии в отделении 2 МКО и руководитель ТК 2-77 и ТК 2-78 МКО