

УДК 535.67

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-5-81-90

Анализ цветовых характеристик источников света на базе светоизлучающих диодов в системах динамического освещения

А.А. Делян, Р.А. Делян, А.Г. Савицкая

Производители осветительного оборудования предоставляют следующие данные, определяющее качество освещения: цветовую температуру излучения, общий индекс цветопередачи и коэффициент пульсации. Однако для профессионального проектирования освещения необходимо знание таких параметров, как изменение спектрального распределения излучения в процессе эксплуатации, воспроизводимость характеристик, влияние условий окружающей среды на световой прибор в целом. Эти сведения позволяют проектировщику учитывать особенности освещаемого объекта.

Новые технологии и источники света — стимул для пересмотра существующих стандартов и правил освещения. Светоизлучающие диоды (СД) — сравнительно новый, перспективный и энергоэкономичный источник света (ИС), обладающий рядом уникальных свойств: большим сроком службы, большой световой отдачей, высоким значением индекса цветопередачи, эстетичностью, экологичностью, надежностью, высокой прочностью, возможностью управления как спектральными, так и интегральными параметрами и характеристиками. Благодаря небольшому размеру светодиодов появилась возможность создавать светильники различных форм, размера и, как следствие, мощности и светового потока. Существующие значения световой отдачи и усовершенствование методики отбора (биннирования) цветных СД позволяют говорить о возможности создания источника белого света на основе цветных кристаллов. Большой интерес для изучения представляют ИС на основе СД в ОУ динамического освещения, так как данные ИС позволяют реализовать диммирование светового потока и изменение цветности излучения независимо друг от друга. Рассмотрены способы создания белых светодиодных модулей с изменяемой цветовой температурой излучения, на основе двухкристалльных люминофорных СД с различной цветовой температурой излучения и многокристалльных СД. Проведенный анализ данных, полученных в результате расчетов, позволил выбрать удачные комбинации СД, обеспечивающие наилучшие значения индекса цветопередачи и воспроизводимость цветовой температуры излучения.

Ключевые слова: белые светоизлучающие диоды, индекс цветопередачи, спектр излучения, люминофор.

Для цитирования: Делян А.А., Делян Р.А., Савицкая А.Г. Анализ цветовых характеристик источников света на базе светоизлучающих диодов в системах динамического освещения // Вестник МЭИ. 2019. № 5. С. 81—90. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-5-81-90.

Analyzing the Color Characteristics of LED Based Light Sources in Dynamic Lighting Systems

A.A. Delyan, R.A. Delyan, A.G. Savitskaya

Lighting equipment manufacturers provide the following data that determine the lighting quality: the color temperature (CT), the general color rendering index and the ripple coefficient. However, for a lighting system to be designed in a professional manner, it is necessary to know such parameters as variation of the radiation spectral distribution in the course of operation, the repeatability of characteristics and the influence of environmental conditions on the light device as a whole. All these parameters and characteristics will allow the designer to take into account the specific features of the facility that has to be illuminated.

New technologies and new light sources give an impetus for revising the existing lighting standards and rules. Light-emitting diodes (LEDs) are a relatively new, promising and energy-efficient light source, which has a number of unique properties: a long service life, high luminous efficiency, a high color rendering index, aesthetics, environmental friendliness, reliability, high strength and the possibility to control both spectral and integral parameters and characteristics. Owing to the compact size of LEDs, it became possible to make luminaires of various shapes and sizes, and, as a result, of different power and luminous flux. The existing values of luminous efficacy and

improvement of the color LED selection (binning) method allow one to speak about the possibility to make a white light source based on color crystals. The use of LED-based light sources in dynamic lighting installations are of great interest for studying them because such light sources open the possibility of dimming the luminous flux and changing the radiation chromaticity independently of each other. Methods of making white LED modules with a variable color temperature (CT) on the basis of two-crystal luminiferous LEDs with different CT and multicrystal LEDs are considered. The accomplished analysis of the data obtained as a result of calculations made it possible to select suitable combinations of LEDs ensuring the best values of the color rendering index and CT repeatability.

Key words: white light-emitting diodes, color rendering index, emission spectrum, phosphor.

For citation: Delyan A.A., Delyan R.A., Savitskaya A.G. Analyzing the Color Characteristics of LED Based Light Sources in Dynamic Lighting Systems. Bulletin of MPEI. 2019;5:81—90. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-5-81-90.

Введение

Естественный свет и его ритм в течение суток и в годовом цикле играют доминирующую роль в регулировании биологических часов, а также суточных и сезонных физиологических и психологических ритмов. Последние открытия в области нейрофизиологии продемонстрировали влияние света на циркадные ритмы человека за счет воздействия на фоторецепторные клетки в сетчатке глаза [1, 2]. В связи с этим возникает вопрос о необходимости учета незрительных функций при проектировании освещения.

На сегодняшний день искусственное освещение должно обеспечивать необходимые уровни видимости и зрительной работоспособности. Современная практика освещения не предполагает динамики света в течение дня. Однако для обеспечения более комфортной световой среды необходима реализация систем динамичного освещения (СДО), которые непосредственно определяют работоспособность и самочувствие человека [3]. Для этого следует выполнить внутреннее освещение таким образом, чтобы оно было максимально приближено к естественному освещению с учетом динамики изменения условий освещения в течение дня.

Для реализации СДО необходим соответствующий источник света (ИС), световой поток которого можно диммировать в пределах 0...100%, и менять цветовую температуру в широком диапазоне (от 2700 до 6500 К) независимо друг от друга [4]. Наиболее целесообразным представляется использование светильников на базе светодиодных модулей (СМ), в состав которых входят светодиодные кристаллы (СД), где за счет изменения пропорции излучений каждого СД можно варьировать цветовую температуру излучения, а посредством регулирования среднего тока, протекающего через СД — световой поток. Для сохранения конкурентоспособности на современном рынке освещения нужно комплексное совершенствование светодиодных светильников в системах освещения, обладающих высокой энергоэффективностью, простотой эксплуатацией, дистанционным управлением, надежностью и большим сроком службы [4].

Следует отметить, что СДО целесообразно использовать в помещениях, в которых выполняется довольно точная зрительная работа, а также с долгим пребыванием людей [5]. При этом необходимо обеспечить не только количественные, но и качественные характеристики излучения СМ.

Информация об общем индексе цветопередачи недостаточна для определения качества цветопередачи излучения. Исследование частных индексов цветопередачи позволяет учитывать особенности ИС. Важно определить воспроизводимость цветовой температуры излучения $T_{\text{цв}}$ СМ от изменения доминирующей длины волны излучения λ_p и ширины спектра излучения на уровне 0,5 от спектрального максимума $\Delta\lambda_{0,5}$ входящих в него цветных кристаллов. Поэтому представляется актуальным формулирование требований к параметрам и характеристикам элементов СМ для применения их в СДО.

Проведен сравнительный анализ спектральных характеристик белых СМ различного типа:

- двухкристалльных с двумя люминофорными светодиодами на основе синего излучения (рис. 1, *a*, данное решение самое распространенное для реализации СДО);

- четырехкристалльные RGBW на основе красного, зеленого, синего и белого люминофорных светодиодов с различной цветовой температурой их излучения $WW=3000$ К, $NW=4000$ К, $SW=6000$ К (рис. 1, *б—г*);

- четырехкристалльные RGBA на основе красного, зеленого, синего и янтарного светодиодов (рис. 1, СМ № д)

В работе [6] показано, что использование четырехкристалльных СМ позволяет добиться лучшего качества цветопередачи. В связи с этим они и были выбраны для исследования.

Спектры СМ № 1 смоделированы на основе смешения излучений теплого и холодного люминофорных СД. Спектры СМ № 2 — на основе RGBWW СД, № 3 — RGBNW СД, №4 — RGBCW СД. Спектры СМ № 5 смоделированы на основе данных компании Nichia из условия создания СМ с максимально высоким индексом цветопередачи. Основой для выбора стали материалы структур кристаллов. Компания Nichia традиционно использует для создания красных СД материал AlInGaN, а для синих и зеленых — InGaN [7]. Технология производства кристаллов обеспечивает высокую световую отдачу и хорошую воспроизводимость характеристик СД.

В качестве элементов СМ использованы светодиоды фирмы Edison Opto Corporation (Тайвань): три люминофорных СД с разной $T_{\text{цв}}$ (WW , NW , SW), а также цветные СД (R , G , B), спектральные характеристики которых были измерены и даны на рис. 1. Выбор продукции компании Edison Opto Corporation основан на ассортименте

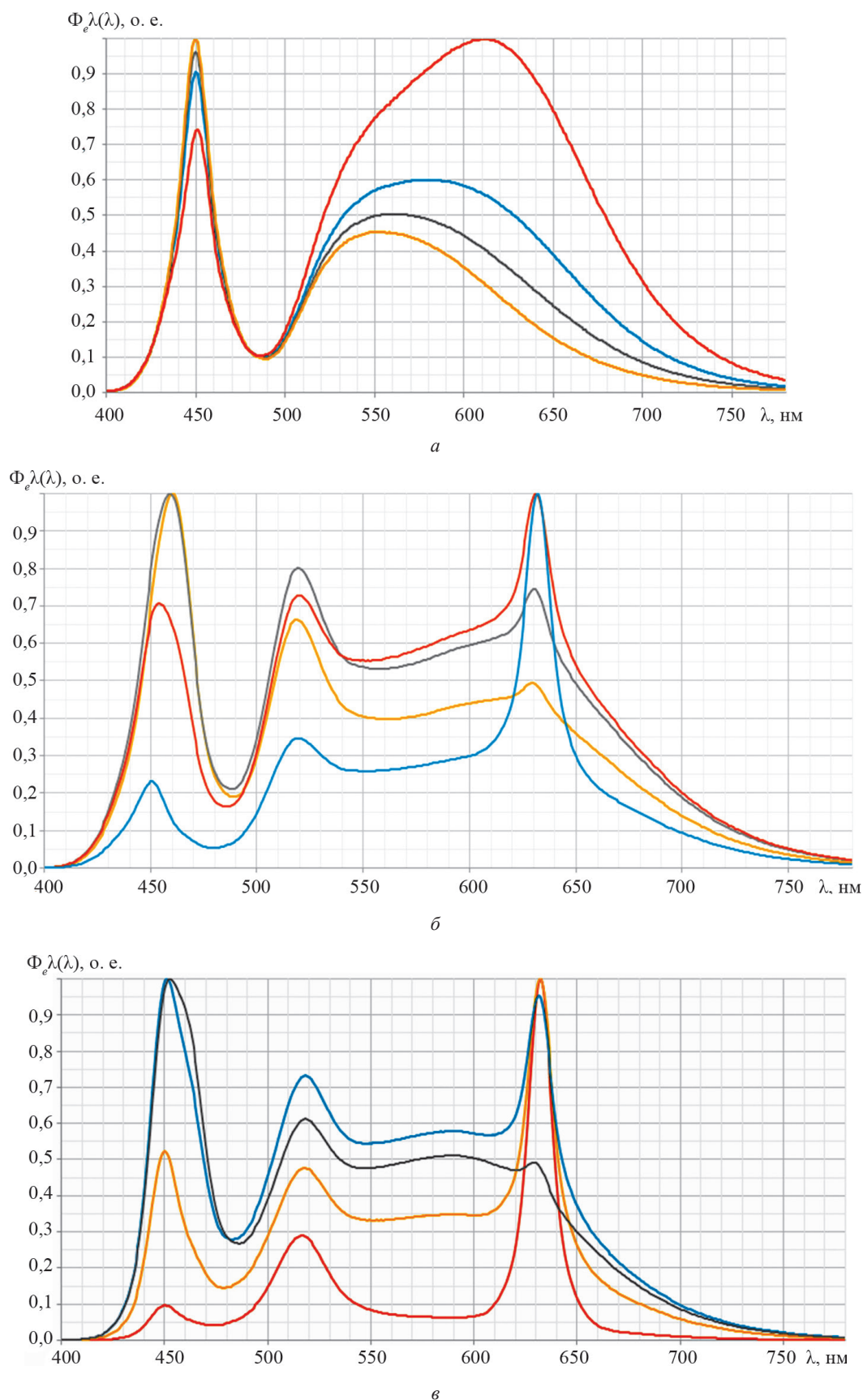


Рис. 1. Относительное спектральное распределение излучения СМ № 1—5 для разных $T_{\text{св}}$:
 а — СМ № 1, — 3000 К; — 4000 К; — 5000 К; — 6500 К; б — СМ № 2, — 3000 К; — 4000 К; — 5000 К; — 6500 К; в — СМ № 3, — 3000 К; — 4000 К; — 5000 К; — 6500 К. Продолжение рис. 1 на стр. 84

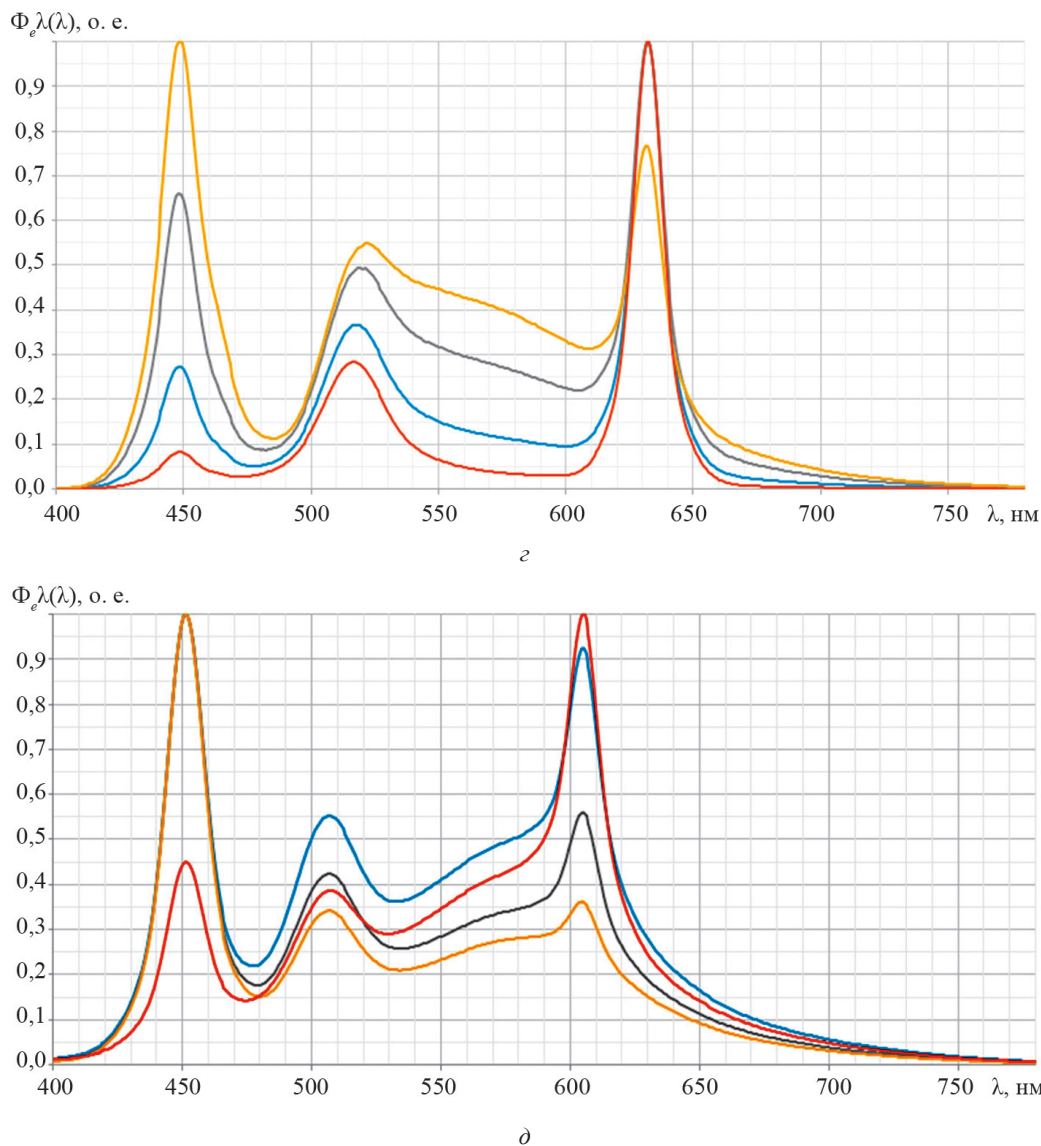


Рис. 1. Относительное спектральное распределение излучения СМ № 1 — 5 для разных $T_{\text{шв}}$ (окончание):
 α — СМ № 4, — 3000 К; — 4000 К; — 5000 К; — 6500 К; δ — СМ № 5, — 3000 К; — 4000 К; — 5000 К; — 6500 К

СД с наиболее характерными спектрами излучения, которые выпускают большинство лидеров рынка.

Оценка цветопередачи и воспроизводимость цветовой температуры излучения

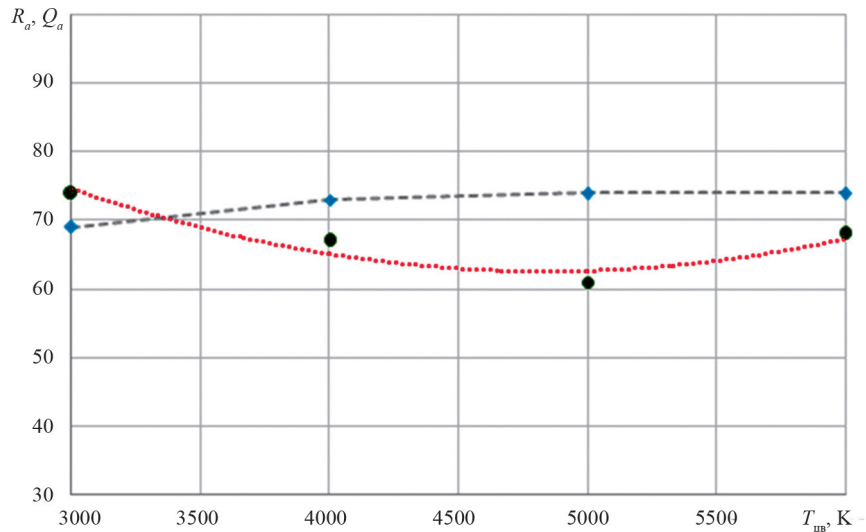
Оценку качества цветопередачи проводили двумя методами: индексов цветопередачи (CRI) и шкалы цветности (CQS). Использование дополнительно метода шкалы цветности для определения качества освещения обусловлено недостатками метода CRI [6]. Расчеты показали, что чем полнее заполнен спектр излучения источника света в видимом диапазоне, тем менее заметна разница оценок качества цветопередачи, определенных этими методами.

Главный недостаток использования СМ на основе двух люминофорных светодиодов — ограниченный диапазон варьирования цветовой температуры, границы которого

определяются коррелированной цветовой температурой излучения выбранных (исходных) белых люминофорных СД. Для СМ №1 R_a меняется в пределах 4 единиц (улучшается и переходит из класса 2В в 2А) и Q_a на 14 единиц во всем диапазоне цветовой температуры (рис. 2).

Для достижения высокого качества цветопередачи необходимо тщательно выбирать белые СД, исходя из особенностей их спектров излучения, используя при создании СМ светодиоды с улучшенной цветопередачей. При использовании люминофорных СД с $R_a \leq 80$ нельзя обеспечить приемлемое качество цветопередачи для использования их во внутреннем освещении.

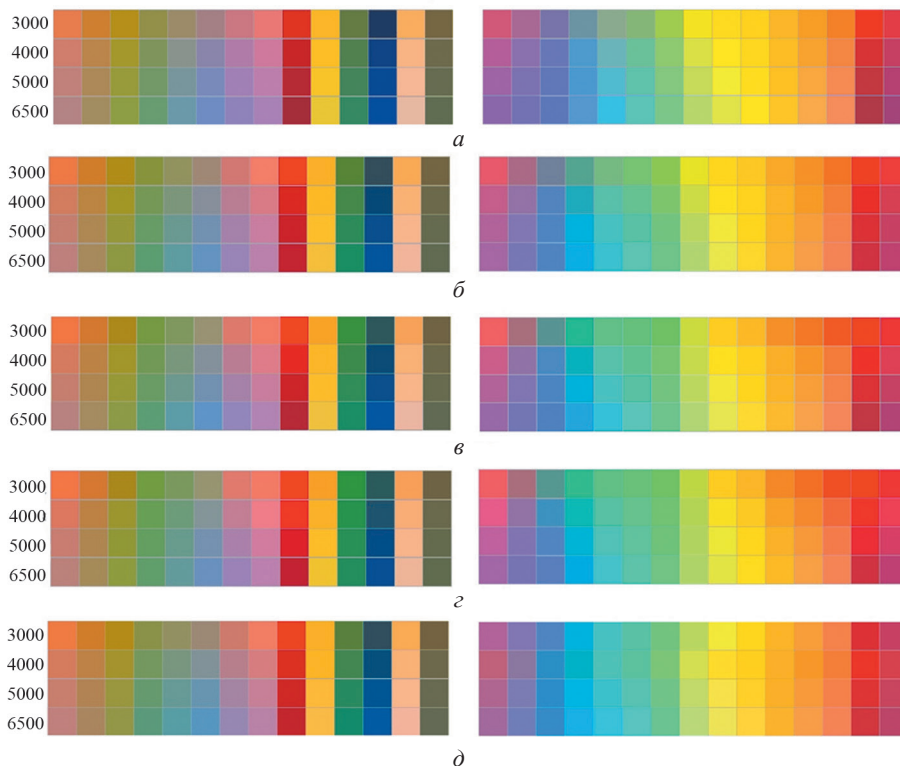
Следует отметить, что высокое значение общего индекса цветопередачи далеко не в полной мере определяет качество цветопередачи ИС, так как восприятие отдельных цветов при освещении объекта данным источником может оказаться на низком уровне. Для пол-

Рис. 2. Зависимость R_a (♦), Q_a (•) от $T_{\text{цв}}$ для CM №1

ного понимания особенностей ИС и его применения следует владеть информацией о его частных индексах цветопередачи (R_i , Q_i). Расчет R_i проводили по 14 цветовым образцам, Q_i — по 15, согласно методикам [8]. Для CM № 1 R_9 (насыщенный красный) = 0 при $T_{\text{цв}} = 5000$ и 6000 К, а значения Q_i для синих образцов (DE3 — DE6) находится в диапазоне от 59 до 18 единиц.

Динамика освещения в течение времени определяет необходимость анализа цветности каждого образца и сравнения их корреляции между собой. Это необходимо, поскольку определение цветопередачи обоими ме-

тодами основано на сравнении исследуемого спектра со стандартным, причем спектр стандартного излучения подбирается таким образом, чтобы его $T_{\text{цв}}$ соответствовала $T_{\text{цв}}$ исследуемого спектра. В случае динамического освещения необходимо провести сравнительный анализ не двух спектров с одинаковой $T_{\text{цв}}$, а проверить именно влияние $T_{\text{цв}}$ на координаты цветности излучения, отраженного от образцов при освещении их рассматриваемыми источниками [5]. Для наглядности на рис. 3 представлены изображения образцов CRI и CQS CM №1 с $T_{\text{цв}}$ 3000, 4000, 5000, 6500 К.

Рис. 3. Образцы CRI и CQS, освещенные CM №1 — 5 (a — d) при разных $T_{\text{цв}}$, К

На рисунке 3 показано изменение цветности образцов при использовании СМ № 1 в системах динамичного освещения. Образцы CRI с повышением $T_{\text{цв}}$ становятся более тусклыми и блеклыми, а образцы CQS при изменении $T_{\text{цв}}$ сохраняют свою насыщенность. Наиболее заметны изменения цветности CRI образцов №1 — 3, №9 — 10 и 13. Для CQS — это синие образцы №3, 4.

При создании светодиодных модулей, используемых в ОУ динамичного освещения, необходимо учитывать воспроизводимость спектральных характеристик излучения исходных светодиодов.

Для СМ № 1 результаты расчета показали, что только для излучений базовых СД с $T_{\text{цв}} = 3000$ и 6500 К координаты цветности (x, y) попадают в диапазон $T_{\text{цв}}$ по стандарту ANSI C78.377A, а для остальных $T_{\text{цв}}$, полученных с помощью смещения спектров, координаты цветности (x, y) оказываются вне регламентируемых четырехугольников (рис. 4). Использовать такие СМ в светодиодных светильниках в системах СДО недопустимо. В связи с этим оценка воспроизводимости характеристик для СМ № 1 не проводилась.

Показатели качества цветопередачи СМ № 2—4 (типа RGBW) на всем диапазоне цветовых температур зависит от цветности излучения выбранного белого люминофорного СД. Для обеспечения высоких значений индекса цветопередачи следует выбирать СД с низкой цветовой температурой (2300...3000 К). Так, при использовании СД с $T_{\text{цв}} = 6000$ К в качестве белого люминофорного в СМ № 4 (RGBCW) цветопередача сильно зависит от цветовой температуры СМ: при малых значениях $T_{\text{цв}}$ характерны низкие значения R_a и Q_a , по мере приближения $T_{\text{цв}}$ излучения светодиодного модуля к $T_{\text{цв}}$ белого люминофорного СД качество цветопередачи значительно возрастает.

При использовании в качестве белого люминофорного СД с $T_{\text{цв}} = 3000$ К в СМ №2 (RGBWW) подобного

эффекта не наблюдается (рис. 5), значение цветопередачи с увеличением $T_{\text{цв}}$ СМ падает незначительно.

Для СМ №2 R_a и Q_a меняются на 11 единиц и варьируются между классами 1В и 1А, для СМ №3 R_a меняется на 61 единицу (переходит из класса 4 в 1А), Q_a увеличивается на 53 единицы. Для СМ № 4 с ростом $T_{\text{цв}}$ R_a возрастает на 59 единиц (повышается с 4 класса до 1В), а Q_a — на 61 единицу.

Изменение цветности образцов при освещении белыми СМ №2 — 4 изображено на рис. 3. Для СМ №3, 4 видно влияние $T_{\text{цв}}$ СМ на насыщенность и яркость цветовых объектов. Наиболее высокую стабильность и качество освещения показывает СМ №2.

Координаты цветности (x, y) для СМ №2 — 4 попадают в регламентируемые четырехугольники во всем диапазоне $T_{\text{цв}}$ (рис. 6).

Вследствие несовершенства технологии производства светодиоды отличаются по своим характеристикам в некотором диапазоне. При создании белых СМ излучения цветных СД смешиваются в определенной пропорции, исходя из номинальных параметров, приведенных в документации на кристаллы. Заранее неизвестно, какие именно значения параметров имеют цветные СД. Это приводит к отклонению цветности белого СМ от расчетного значения.

Определен допустимый диапазон значений λ_p цветных СД (R, G, B) в диапазоне $T_{\text{цв}} = 2700...6500$ К. Расчет координат цветности (x, y) СМ №2 — 4 проходил при изменении λ_p случайным образом у каждого из цветных кристаллов на величину от 1 до 15 нм в большую и меньшую стороны при сохранении расчетной пропорции излучений. Результаты сведены в табл. 1.

Из представленных данных следует, для СМ №2 требования по воспроизводимости координат цветности (x, y) находятся в диапазоне длин волн с большим разбросом, в отличие от СМ №4, где требования к воспроизводимости к красному СД наиболее жесткие.

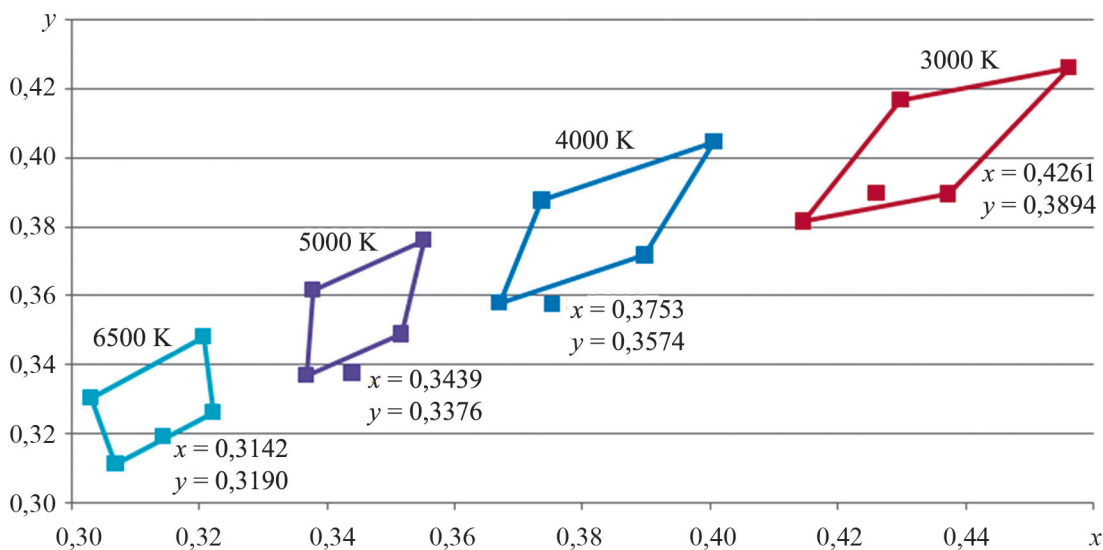
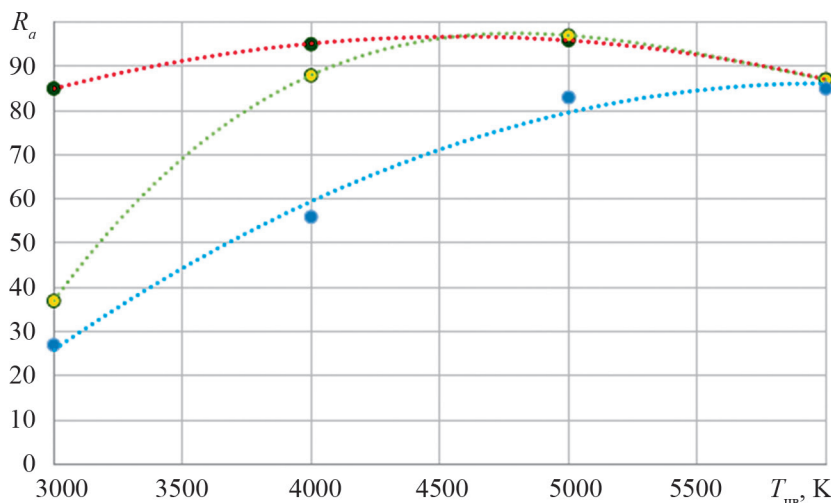
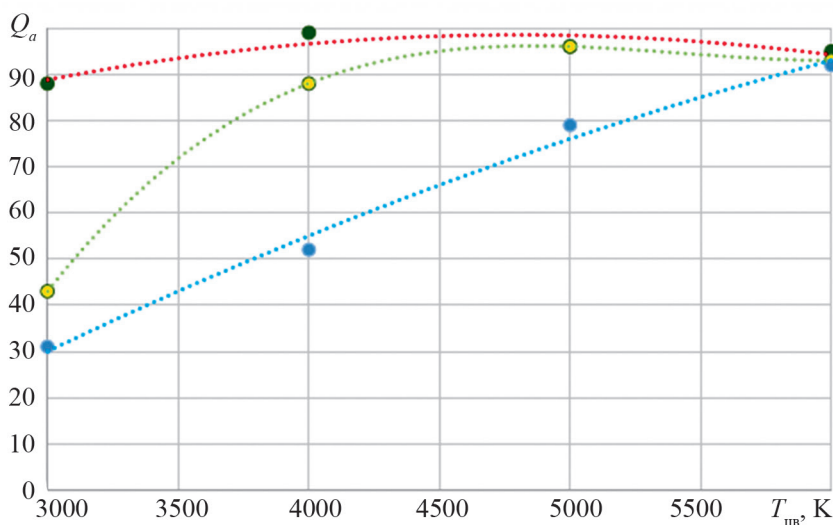


Рис. 4. Координаты цветности СМ № 1 во всем диапазоне $T_{\text{цв}}$



a



б

Рис. 5. Зависимость R_a (a) и Q_a (б) белых СМ №2 — 4 в зависимости от $T_{кр}$ люминофорного кристалла:

● — RGBWW; ● — RGBNW; ● — RGBCW

Таблица 1

Допустимый диапазон изменения λ_p

Светодиодные модули	Разброс значений λ_p для светоизлучающих диодов, нм		
	красный	зеленый	синий
№ 2 (RGBWW)	+4...-5	+6...-5	+7...-4
№ 3 (RGBNW)	+3...-2	+8...-3	+8...-5
№ 4 (RGBCW)	+1...-2	+4...-1	+12...-3

Для СМ № 5 возможно добиться достаточно высокого качества цветопередачи R_a и $Q_a > 75$, однако постоянство значений R_a и Q_a на всем диапазоне цветовых температур отсутствует (рис. 7). Они падают на 13 единиц (понижаются из классов 1А в 2А по методу CRI).

Изменение цветности образцов при освещении белыми СМ №5 дано на рис. 3. Наблюдается снижение

насыщенности образцов с повышением $T_{кр}$. Наихудшая цветопередача наблюдается у синих образцов.

Координаты цветности (x, y) для СМ №5 также попадают в регламентируемые четырехугольники во всем диапазоне $T_{кр}$ (рис. 8).

Допустимый диапазон изменения λ_p для кристаллов, входящих в СМ № 5 на всем диапазоне $T_{кр}$, представлен в табл. 2. В сравнении с люминофорными СМ №2 — 4 требования к воспроизводимости λ_p в данном случае жестче.

Расчеты значений индекса цветопередачи показывают, что при фиксированной цветовой температуре лишь малая часть из исследованных СМ подходит для применения в ОУ с высокими требованиями к качеству освещения ($R_a > 90$) [4]. Таким образом, для СДО необходимо подбирать ИС особенно тщательно и, вероятнее всего, следует отдать предпочтение другим типам СД (пятикристальным и т. п.).

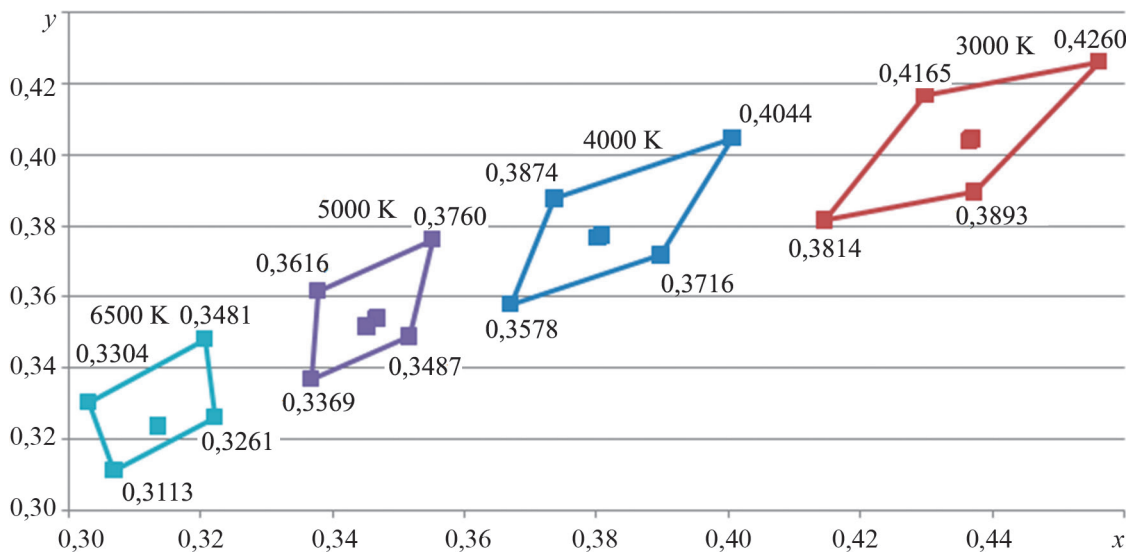


Рис. 6. Координаты цветности CM №2 — 4 во всем диапазоне $T_{цв}$

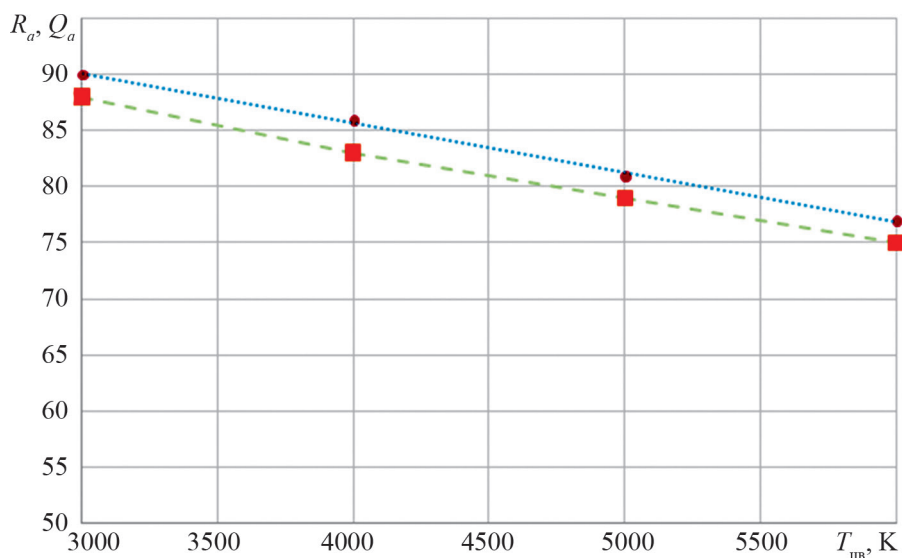


Рис. 7. Зависимости общих индексов цветопередачи R_a (●) и шкалы цветности Q_a (■) для CM №5

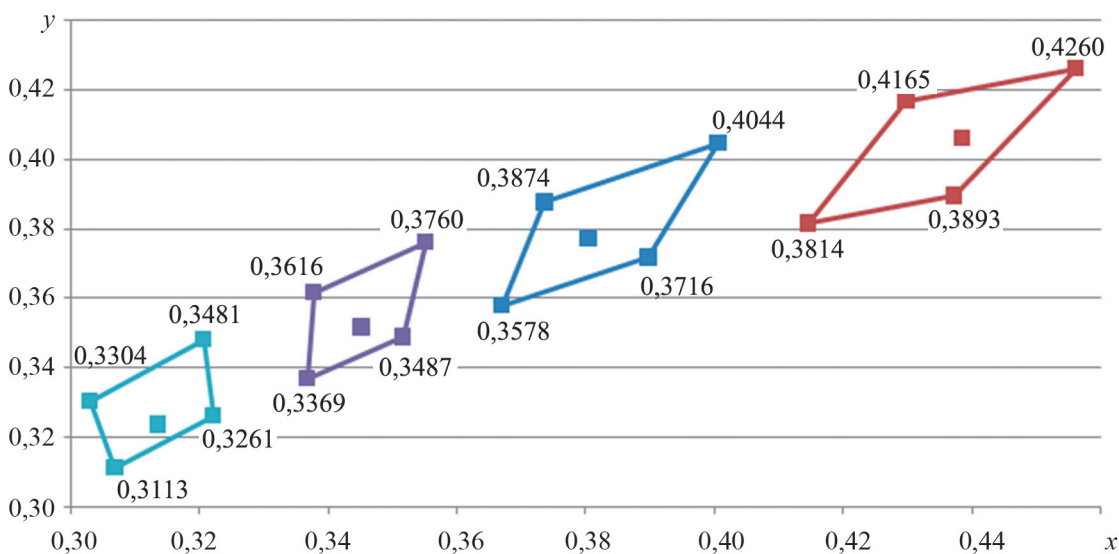


Рис. 8. Координаты цветности CM №5 во всем диапазоне $T_{цв}$

Таблица 2

Допустимый диапазон изменения λ_p для СМ №5

Светоизлучающие диоды, нм			
красный	оранжевый	зеленый	синий
+2...-1	+2...-1	+3...-1	+1...-1

Выводы

Люди проводят большое количество времени, выполняя определенные виды работ без естественного освещения [9]. Светоизлучающие диоды расширили технические возможности создания ОУ с существенно улучшенными энергетическими и эксплуатационными характеристиками. Последние эксперименты показали, что освещение светодиодами не вызывает негативного воздействия на орган зрения и организм человека в целом [10 — 14]. При создании светодиодного светильника для СДО с высокими требованиями к цветовым характеристикам следует рассматривать большое количество факторов, а также проводить тщательный контроль компонентов.

Литература

1. Ir W.J.M. van Bommel, Ir G. J. van den Beld. Lighting for Work: Visual and Biological Effects. Netherlands: Philips Lighting, 2003.
2. Berson D.M., Dunn F.A., Motoharu Takao. Phototransduction by Retinal Ganglion Cells That Set the Circadian Clock // Sci. 2002. V. 295. Pp. 1070—1073.
3. Cajochen C. e. a. High Sensitivity of Human Melatonin, Alertness, Thermoregulation, and Heart Rate to Short Wavelength Light // J. Clinical Endocrinology & Metabolism. 2005. No. 3. Pp. 1311—1316.
4. Делян А.А. Исследование воспроизводимости спектральных характеристик управляемых светодиодных источников света: магистерская дис. М.: МЭИ, 2016.
5. Савицкая А.Г. Исследование источников света на базе светоизлучающих диодов в осветительных установках динамического освещения: магистерская дис. М.: МЭИ, 2017.
6. Елисеев Н.П., Решёнов С.П. О предельных световых и цветовых характеристиках белых светодиодов // Светотехника. 2012. № 4. С. 12—18.
7. Nichia [Официальный сайт] <http://www.nichia.co.jp/ru> (дата обращения 15.10.2018).
8. Davis W., Ohno Y. Color quality scale // Optical Eng. 2010. V. 49 (3). Pp. 033602—033616.
9. Закгейм А.Л. Светодиодные системы освещения: энергоэффективность, зрительное восприятие, безопасность для здоровья (обзор) // Светотехника. 2012. № 6. С. 12—21.
10. Амеликина С.А., Железникова О.Е., Синицына Л.В. Об эффективности освещения светодиодами по зрительной работе // Светотехника. 2018. № 2. С. 6—10.

Наилучшие результаты значений индексов цветопередачи R_a и шкалы цветности Q_a были получены для СМ № 2 типа RGBW ($\lambda_{\text{красн}} = 450$ нм, $\lambda_{\text{зел}} = 520$ нм, $\lambda_{\text{красн}} = 632$ нм) с теплым люминофорным светодиодом с $T_{\text{цвв}} = 3000$ К ($R_a \geq 85$ и $Q_a \geq 88$ во всем диапазоне $T_{\text{цв}}^*$).

Опыты подтвердили, что СМ №1 (на базе двух люминофорных СД) имеют свои недостатки, в связи с чем применять этот модуль в СДО не рекомендуется. Причиной низкой цветопередачи является уменьшенный энергетический поток в области 470...500 нм, что не позволяет получить высокую цветопередачу для синезеленых и зеленых образцов. При выборе кристаллов для белого СМ на основе двух СД необходимо проводить тщательный отбор образцов, уделяя особое внимание их спектральному составу.

Требуют дальнейшего исследования вопросы влияния изменения ширины спектра излучения на уровне 0,5 от спектрального максимума $\Delta\lambda_{0,5}$ на качество цветопередачи и воспроизводимости $T_{\text{цв}}^*$, а также учета и влияния естественного света на качество освещения.

References

1. Ir W.J.M. van Bommel, Ir G. J. van den Beld. Lighting for Work: Visual and Biological Effects. Netherlands: Philips Lighting, 2003.
2. Berson D.M., Dunn F.A., Motoharu Takao. Phototransduction by Retinal Ganglion Cells That Set the Circadian Clock. Sci. 2002; 295:1070—1073.
3. Cajochen C. e. a. High Sensitivity of Human Melatonin, Alertness, Thermoregulation, and Heart Rate to Short Wavelength Light. J. Clinical Endocrinology & Metabolism. 2005;3:1311—1316.
4. Delyan A.A. Issledovanie Vosproizvodimosti Spekt-ral'nykh Kharakteristik Upravlyаемykh Svetodiodnykh Istochnikov Sveta: Magisterskaya Dis. M.: MEI, 2016. (in Russian).
5. Savitskaya A.G. Issledovanie Istochnikov Sveta na Baze Svetoizluchayushchikh Diodov v Osvetitel'nykh Ustanovkakh Dinamichnogo Osveshcheniya: Magisterskaya Dis. M.: MEI, 2017. (in Russian).
6. Eliseev N.P., Reshenov S.P. O predel'nykh Svetovykh i Tsvetovykh Kharakteristikakh Belykh Svetodiodov. Svetotekhnika. 2012;4:12—18. (in Russian).
7. Nichia [Ofits. Sayt] <http://www.nichia.co.jp/ru> (Data Obrashcheniya 15.10.2018). (in Russian).
8. Davis W., Ohno Y. Color quality scale. Optical Eng. 2010;49 (3):033602—033616.
9. Zakgeym A.L. Svetodiodnyye Sistemy Osveshcheniya: Energoeffektivnost', Zritel'noe Vospriyatie, Bezopasnost' Dlya Zdorov'ya (Obzor). Svetotekhnika. 2012;6:12—21. (in Russian).
10. Amel'kina S.A., Zheleznikova O.E., Sinitsyna L.V. Ob Effektivnosti Osveshcheniya Svetodiodami po Zritel'noy Rabote. Svetotekhnika. 2018;2:6—10. (in Russian).

11. **Текшева Л.М.** Сравнительная гигиеническая оценка условий освещения с люминесцентными лампами и светодиодными источниками света в школах // Светотехника. 2012. № 5. С. 16—22.

12. **Кучма В.Р., Сухарева Л.М., Текшева Л.М., Степанова М.И., Сазанюк З.И.** Гигиенические аспекты применения светодиодных источников света для общего освещения в школах // Гигиена и санитария. 2013. № 5. С. 27—31.

13. **Рябцева А.А. и др.** Исследование остроты зрения у лиц молодого возраста в зависимости от спектрального состава искусственного освещения // Светотехника. 2016. № 6. С. 26—29.

14. **Гюлер Ё., Манав Б., Онайгил С., Эркин Е.** Экспериментальное сравнение энергетических характеристик и зрительной комфортности люминесцентных и светодиодных трубчатых ламп // Светотехника. 2014. № 3. С. 18—23.

11. **Teksheva L.M.** Sravnitel'naya Gigienicheskaya Otsenka Usloviy Osveshcheniya s Lyuminestsentnymi Lampami i Svetodiodnymi Istochnikami Sveta v Shkolakh. Svetotekhnika. 2012;5:16—22. (in Russian).

12. **Kuchma V.R., Sukhareva L.M., Teksheva L.M., Stepanova M.I., Sazanyuk Z.I.** Gigienicheskie Aspekty Primeneniya Svetodiodnykh Istochnikov Sveta dlya Obshchego Osveshcheniya v Shkolakh. Gigiena i Sanitariya. 2013;5:27—31. (in Russian).

13. **Ryabtseva A.A. i dr.** Issledovanie Ostroty Zreniya u Lits Molodogo Vozrasta v Zavisimosti ot Spektral'nogo Sostava Iskusstvennogo Osveshcheniya. Svetotekhnika. 2016;6:26—29. (in Russian).

14. **Gyuler E., Manav B., Onaygil S., Erkin E.** Eksperimental'noe Sravnenie Energeticheskikh Kharakteristik i Zritel'noy Komfortnosti Lyuminestsentnykh i Svetodiodnykh Trubchatykh Lamp. Svetotekhnika. 2014;3:18—23. (in Russian).

Сведения об авторах:

Делян Анна Ашотовна — магистр по направлению «Электроника и нанoeлектроника» НИУ «МЭИ», e-mail: anna_delyan@mail.ru

Делян Рузана Ашотовна — ассистент кафедры светотехники НИУ «МЭИ», e-mail: ruzana_delyan@mail.ru

Савицкая Анна Германовна — аспирант кафедры светотехники НИУ «МЭИ», e-mail: any-sav@yandex.ru

Information about authors:

Delyan Anna A. — Master Student in «Electronics and Nanoelectronics», NRU MPEI, e-mail: anna_delyan@mail.ru

Delyan Ruzana A. — Assistant of Lighting Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: ruzana_delyan@mail.ru

Savitskaya Anna G. — Ph.D.-student of Lighting Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: any-sav@yandex.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 13.03.2019

The article received to the editor: 13.03.2019