

Экспериментальные исследования методов оценки качества цветопередачи

Д.В. СКУМС¹, Л.Д. ЧАЙКОВА

РУП «Белорусский государственный институт метрологии», Минск, Республика Беларусь

Аннотация

Рассмотрены принципы оценки качества цветопередачи энергосберегающих источников света. Показаны недостатки действующего метода оценки качества цветопередачи и описаны альтернативные метрики. Приведены результаты визуальных экспериментов по оценке качества цветопередачи светодиодных источников света и их сравнения с теоретическими предсказаниями. Показаны возможные направления модернизации метода оценки цветопередачи CQS.

Ключевые слова: светодиодные источники света, индекс цветопередачи, МКО, CQS.

Введение

До 20 % потребляемой электроэнергии в Республике Беларусь приходится на освещение улиц и помещений [1, 2]. В последнее время широкое распространение получили КЛЛ. Однако их применение сопряжено с рядом трудностей. В частности, они являются ртутьсодержащими, и требуются специальные меры для их утилизации, что, безусловно, снижает экономический эффект от внедрения этих ламп и загрязняет окружающую среду. Подобных недостатков лишены светодиодные источники света (СДИС), обладающие рядом хорошо известных достоинств [3, 4]. Анализ действующих технических нормативных правовых актов (ТНПА) показал, что к значению индекса цветопередачи (ИЦП) для источников света предъявляется ряд требований, выход за рамки которых влечёт запрет на применение таких источников. В то же время отсутствуют какие-либо ТНПА, нормирующие методику измерения ИЦП современных энергосберегающих источников света. Единственным ТНПА, нормирующим методы измерения цветовых

характеристик источников света, является устаревший ГОСТ 23198–94 [5]. (Он был основан на публикации МКО 1974 года «Методы измерения и спецификации свойств цветопередачи источников света», тогда как действующей является версия 1994 года.) По аналогичной причине Минэнерго США рекомендовало просто не использовать ИЦП как показатель качества СДИС. Однако данное решение неприемлемо в Республике Беларусь, так как действует ряд ТНПА, регламентирующих значения ИЦП [5, 6].

Теоретические основы оценки качества цветопередачи

Как известно, ИЦП характеризует сходство или различие цветовых стимулов при восприятии наблюдателем, когда объект освещается исследуемым и опорным источниками света [6]. В качестве тестового объекта при определении ИЦП используются 8 стандартных образцов из атласа Мансела.

Общий ИЦП R_a , рекомендованный МКО, определяется как

$$R_a = \sum_{i=1}^8 R_i,$$

$$R_i = 100 - 4,6 \Delta E_a,$$

где R_i – частный индекс цветопередачи, рассчитанный для одного стандартного образца, ΔE_a – цветовое различие между исследуемым и опорным источниками света, рассчитанное в колориметрической системе $W^*U^*V^*$ [7] (рис. 1). Коэффициент 4,6 был подобран таким образом, чтобы R_a люминесцентных ламп с галофосфатным люминофором составлял 50.

R_a имеет ряд существенных недостатков, заложенных в основу метода. Цветовое пространство, применяемое при расчёте цветовых различий, больше не рекомендуется МКО, так как имеет большую неоднородность в красной области. Большим источником погрешности результатов измерений служит и то, что в качестве опорного рекомендовано использовать источник света с той же или максимально близкой коррелированной цветовой температурой (КЦТ), что и у испытуемого. До КЦТ 5000 К это абсолютно чёрное тело, а при КЦТ выше 5000 К – излучения типа D (разные фазы дневного света). Расчёты показывают, что источник с КЦТ 4999 К и $R_a=100$ получит R_a , значительно меньший, если его КЦТ поднимется всего на 2 К [8]. Большим недостатком R_a является то, что он рас-

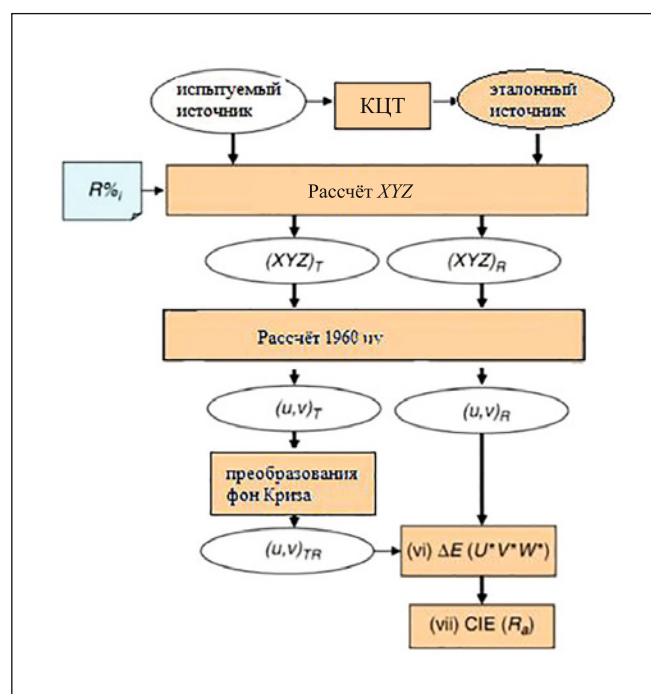


Рис. 1. Блок-схема расчёта R_a

¹ E-mail: dmitri_scums@mail.ru, optic@belgim.by

считывается как среднее арифметическое 8 частных ИЦП. Таким образом, источник света с крайне низкой цветопередачей в какой либо части спектра получит за счёт усреднения высокий ИЦП. При этом потребитель не может всесторонне оценивать качество источника света. Особенно ярко эта проблема проявляется при расчёте ИЦП современных энергосберегающих источников света, таких как КЛЛ и СДИС. Спектр излучения последних существенно иной, чем у абсолютно чёрного тела и стандартных источников света МКО. В публикации [9] эта проблема наглядно показана. При этом в качестве испытуемого был взят СД-кластер на основе СД голубого (460 нм), зелёного (540 нм) и оранжевого (605 нм) свечения, имеющий КЦТ 3300 К и R_a 81. После этого была построена математическая модель аналогичного излучателя с пиками излучения на длинах волн 455, 534 и 616 нм и с R_a 67. (Что делает такой источник света неприемлемым для жилых помещений.) Однако исследования частных ИЦП R_i показали, что данный СД-кластер значительно лучше передаёт большинство цветов за исключением сине-голубой области, что и вызвало существенное снижение ИЦП. При этом потребители отдадут предпочтение именно таким источникам света. Кроме того, в процессе расчёта цветового сдвига применяются устаревшие преобразования фон Криза. В настоящее время МКО рекомендует применять две модели цветового преобразования: *Colour Measurement Committee's Chromatic Adaptation Transform of 2000 (CMSCAT2000)* и *CIE's Chromatic Adaptation Transform (CIE CAT02)*.

Опираясь на все вышеизложенные доводы, МКО в 2007 г. опубликовала технический отчёт CIE177:2007 «Измерение цветопередачи белых светодиодов». В его результирующей части сказано, что ИЦП МКО R_a нельзя применять для оценки цветопередачи источников света на основе белых СД (или имеющих их в своём составе). МКО рекомендует разработать новый ИЦП или другую метрику оценки качества цветопередачи. Новый дополнительный ИЦП (или набор ИЦП) должен быть применим ко всем типам источников света, а не только к белым СДИС [10].

Альтернативные метрики оценки качества цветопередачи

Из анализа литературы следует, что взамен действующего ИЦП R_a предложены следующие метрики:

- **Rank-order based color rendering index (RCRI)** [11]. Является модификацией действующего метода с 17 тестовыми образцами (1–12 из набора «Color checker» фирмы *GretaghMacbeth* и 13–17 из набора «Color Set» NIST). Для расчёта цветовых различий применена модель цветового восприятия *CAM02UCS*. Опорные источники света аналогичны источникам для действующего метода МКО. После расчёта цветовых различий по специальной формуле они переводятся в ранговую шкалу от 1 до 6, где 1 означает прекрасную цветопередачу, а 5 – очень плохую, абсолютно неприемлемую.

- **Feel of contrast index (FCI)** [12]. Данный ИЦП численно выражает ощущение контраста цвета тестовых образцов от перехода от опорного источника к испытуемому. В качестве опорного источника света используется источник типа *D65*. Тестовые образцы – *5R4/12*, *5Y8.2/10*, *5.5G 5/8* и *4.5PB3.2/6* (красный, жёлтый, зелёный и синий) из атласа Мансела. Рассчитывается по формуле

$$FCI = (G(T, E_t = 1000 \text{ Lx}) / G(D65, E_t = 1000 \text{ Lx})),$$



Рис. 2. Внешний вид камеры визуальной оценки цветопередачи, подготовленной к эксперименту. Правая половина камеры освещена опорным источником, а левая светодиодным источником света «3»

где $G(T, E_t = 1000 \text{ Lx})$ – суммарная площадь фигуры, образованной в цветовом пространстве *LAB* соединением точек с координатами цветности тестовых образцов при освещении их испытуемым источником, значение освещённости – 1000 лк, $G(D65, E_t = 1000 \text{ Lx})$ – суммарная площадь фигуры, образованной в цветовом пространстве *LAB* соединением точек с координатами цветности тестовых образцов при освещении их излучением D_{65} .

- **CRI-CAM02UCS** [13]. Модификация ИЦП МКО R_a . Процедура расчёта этого ИЦП – как в расчёте R_a за исключением того, что преобразования фон Криза заменены на *CIE CAT02* и применяется модель цветового восприятия *CAM02UCS*. Общий ИЦП *CRI-CAM02UCS* рассчитывается как

$$CRI-CAM02UCS = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (100 - 8 \Delta E_{iCRI-CAM02UCS}),$$

где $\Delta E_{iCRI-CAM02UCS}$ – цветовое различие тестовых образцов при переходе от света опорным источником к испытуемому, рассчитанное согласно модели *CAM02UCS*, i – номер стандартного образца.

- **Color quality scale (CQS)** [14]. Данная метрика идейно близка к методу расчёта R_a . Однако в отличие от своей первоосновы учитывает разные аспекты качества цвета, такие как цветопередача, цветовая дискриминация и предпочтения наблюдателей. Шкала основана на 15 манселовских образцах, имеющих более насыщенный цвет, чем в методе расчёта R_a . Преобразования фон Криза заменены на *CMSCAT2000*. Расчёты цветовых различий проводятся в цветовом пространстве *LAB*. Общий ИЦП Q_a рассчитывается по формуле

$$Q_a = M_{CCT} \cdot 10 \ln(\exp((100 - 3,1 \cdot \Delta E_{RMS}) / 10) + 1),$$

где ΔE_{RMS} – среднеквадратическое отклонение цветовых различий тестовых образцов при переходе от света опорным источником к испытуемому, M_{CCT} – поправочный коэффициент, штрафующий источники с экстремально низкой КЦТ. Последний

вводится для того чтобы источники с низкой КЦТ и спектральным распределением близким к планковскому не получали высокий конечный ИЦП вследствие особенностей расчётного метода. Вычисляется по формуле

$$M_{CST} = T^3(9,2672 \cdot 10^{-11}) - T^2(8,3959 \cdot 10^{-7}) + T(0,00255) - 1,612$$

(при $T < 3500$ K),
 $M_{CST} = 1$ (при $T \geq 3500$ K).

- **Harmony rendering index (HRI)** [14]. ИЦП определяется как разность в цветовой гармонии тестовых образцов при освещении опорным и испытуемым источниками света.

- **Categorical color rendering index (CCRI)** [15]. В основе метода лежит визуальная оценка наблюдателями большого количества (в экспериментах авторов использовалось 295) образцов при освещении их опорным и испытуемым источниками света.

- **Memory CRI (MCRI)** [16]. Метод основан на эффекте памяти цвета. В качестве тестовых образцов используют реальные объекты (фрукты и т.п.).

Следует отметить, что каждый из этих методов, исправляя те или иные недостатки ИЦП МКО R_a , не решает полностью задач, поставленных в отчёте [10]. В связи с этим нами были проведены эксперименты с участием наблюдателей для выявления наиболее перспективных методик оценки качества цветопередачи.

Экспериментальные исследования

Выбор той или иной методики оценки цветопередающих характеристик современных энергосберегающих источников света невозможен путём лишь теоретического анализа. Колориметрия лежит на стыке физической оптики и биологии. Зрительная система человека слишком сложна для численного моделирования, поскольку в основе её функционирования лежат не только легко поддающиеся моделированию законы геометрической оптики, но и сложные психофизиологические процессы. В связи с этим всякая модель должна пройти валидацию в экспериментах с наблюдате-

Приложение Б

Опросный лист участника эксперимента по визуальной оценке цветопередачи

Ваш возраст _____

Ваш пол: муж жен

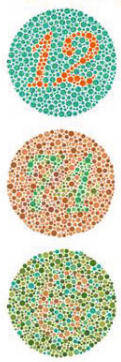
Имеете ли Вы дефекты зрения, если да то какие? _____

Укажите Вашу остроту зрения, можно приблизительно _____

По шкале от одного до десяти оцените свое психологическое состояние, где 1 - абсолютно спокоен, 10 - крайне раздражен _____

По шкале от одного до десяти оцените свое физическое состояние, где 1 - свежи и бодр, 10 - крайне устал, чувствую себя очень плохо _____

Напишите, какую цифру Вы видите на картинке



Источник 1:
 Видите ли вы различие между правыми и левыми цветовыми образцами:
 Да Нет

Если да, оцените близость цвета левого образца в сравнении с правым по десятибалльной шкале, где 0 - совсем не похожи, 10 - абсолютно одинаковые _____

Источник 2:
 Видите ли вы различие между правыми и левыми цветовыми образцами:
 Да Нет

Если да, оцените близость цвета левого образца в сравнении с правым по десятибалльной шкале, где 0 - совсем не похожи, 10 - абсолютно одинаковые _____

Источник 3:
 Видите ли вы различие между правыми и левыми цветовыми образцами:
 Да Нет

Если да, оцените близость цвета левого образца в сравнении с правым по десятибалльной шкале, где 0 - совсем не похожи, 10 - абсолютно одинаковые _____

Источник 3+:
 Видите ли вы различие между правыми и левыми цветовыми образцами:
 Да Нет

Если да, оцените близость цвета левого образца в сравнении с правым по десятибалльной шкале, где 0 - совсем не похожи, 10 - абсолютно одинаковые _____

Источник 123:
 Видите ли вы различие между правыми и левыми цветовыми образцами:
 Да Нет

Если да, оцените близость цвета левого образца в сравнении с правым по десятибалльной шкале, где 0 - совсем не похожи, 10 - абсолютно одинаковые _____

Рис. 3. Опросный лист наблюдателей

лями. Основой для проведения экспериментов по оценке цвета с участием наблюдателей является камера визуальной оценки и сравнения цвета, или так называемый цветовой кабинет. Типовой цветовой кабинет представляет собой камеру, разделённую на два отделения, освещаемые испытуемым и опорным источниками соответственно. Внутренняя поверхность кабинета покрывается серой матовой краской, чтобы исключить явление контраста. Поверхность, на которой находятся образцы, должна иметь цвет от светло серого до средне серого и коэффициент отражения около 30%. Освещаемые образцы располагают как можно ближе друг к другу, а разделительную линию между ними делают как можно тоньше. Уровень освещённости, устанавливаемый для оценки цвета, должен составлять 700–3000 лк (большие уровни предпочтительны для оценки тёмных цветов) и быть одинаковым в обоих отделениях кабинета. Камера помещается на такой высоте, чтобы угол наблюдения для наблюдателя среднего роста составлял бы около 45% [17]. Исходя из вышеизложенных правил, совместно с Республиканским научно-производственным унитарным предприятием «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий Национальной академии наук Беларуси» была создана камера визуальной оценки цветопередачи (рис. 2).

В качестве испытуемых нами было подготовлено 4 СДИС белого свечения с разной КЦТ. Опорным источником являлась ГЛН, работающая в режиме источника типа А МКО.

СДИС «1» – КЦТ (2856 ± 150) К. Содержит белые широполосные люминофорные СД. КЦТ источника подобрана так, чтобы соответствовать стандартному источнику типа А МКО.

СДИС «2» – КЦТ (6500 ± 250) К. Содержит белые широполосные люминофорные СД. КЦТ источника подобрана так, чтобы соответствовать стандартному источнику типа D65 МКО.

СДИС «3» – КЦТ (4500 ± 350) К. Содержит полноцветные (RGB-) СД. КЦТ специально не подбиралась.

СДИС «3+» – КЦТ (4500 ± 350) К. Аналогичен СДИС «3», но имеет улучшенную цветопередачу по МКО. КЦТ специально не подбиралась.

Кроме того, предусмотрена возможность включения всех СДИС одновременно – так называемый СДИС «123».

Источники света, ПРА и УУ, средства регулировки и индикации режимов работы камеры размещаются в её верхней части, над рабочей зоной. Освещённость на поверхности, на которой находились образцы – (2000 ± 15) лк. Образцами сравнения в эксперименте являлись набор эталонных цветов «Color Checker» фирмы

Результаты эксперимента по визуальной оценке цветопередачи

Метрика / Свето-диодный источник света	R_a	CQS	$NCRI$	FCI	$CRI-CAM02UCS$	Среднее арифметическое результатов оценки качества цветопередачи наблюдателями, баллы
«1»	93	80	88	71	77	8,3
«2»	45	40	44	44	45	3,8
«3»	38	32	32	21	32	2,7
«3+»	44	24	21	29	16	2,1
«123»	65	52	57	60	55	5,0

GretaghMacbeth (24 цветных образца из атласа Мансела), фрукты и ярко окрашенные банки прохладительных напитков. Наблюдатель, сидя перед камерой визуальной оценки, должен был оценить близость цвета левого образца в сравнении с правым по десятибалльной шкале, где 0 – совсем не похожи, 10 – абсолютно одинаковые. Левый образец – образец освещённый испытуемым источником, правый – опорным. Перед началом эксперимента наблюдатели заполняли опросный лист (рис. 3), в котором указывали: своё психологическое состояние по шкале от одного до десяти, где 1 – абсолютно спокоен, 10 – крайне раздражён; наличие дефектов зрения и его остроту, а также проходили тест Исихары на цветовую слепоту и дефекты цветового зрения. Результаты оценки качества цветопередачи заносились в опросный лист экспериментатором со слов наблюдателя.

Данные полученные от наблюдателей, сравнивались с результатами численного моделирования. Для проведения численного моделирования было разработано специальное программное обеспечение, обеспечивающее расчёт ИЦП R_a , CQS , $NCRI$, FCI , $CRI-CAM02UCS$. Данные метрики были выбраны по критерию «наличие чёткого алгоритма расчёта показателя качества цветопередачи». Измерения спектра излучения источников света (рис. 4) выполнены с помощью спектрорадиометра фирмы *Konica-Minolta* «CS-1000» из состава колориметрического блока Национального эталона единиц силы све-

та и освещённости Республики Беларусь НЭ РБ 8–02.

Полученные результаты и их обсуждение

В эксперименте приняло участие 38 человек (22 женщины и 16 мужчин). Средний возраст наблюдателей – 25 лет, самому старшему – 60, самому младшему – 18 лет. После отсела по критериям негативного психологического состояния и (или) наличия аномалий цветовосприятия по тесту Исихары для расчётов были использованы данные от 30 наблюдателей. Результаты приведены в таблице.

Из таблицы видно, что результаты, наиболее близкие к результатам эксперимента, показала метрика CQS . Она в наибольшей мере учитывает недостатки ИЦП R_a . Специально подобранные авторами образцы сравнения с цветами большей насыщенности, чем у применяемых ныне, использование новейшей общепризнанной модели цветовой адаптации – модели *CMSCAT2000*, а также оригинальный метод расчёта суммарного цветового сдвига, позволили решить почти все задачи поставленные в отчёте [10]. Вместе с тем данная метрика не устраняет один из основных недостатков определения ИЦП R_a – изменение нескольких принципиально разных видов опорных источников света. По нашему мнению, это особенный минус в случае оценки цветопередачи СДИС, поскольку, как указывалось выше, могут существовать ситуации, когда 2 визуально неразли-

чимых СДИС получают заметно разные оценки². В связи с этим встаёт вопрос о введении или нового опорного источника света, или единого для всех значений КЦТ испытуемого источника света. Первый вариант представляется нам более предпочтительным, но пока светотехническая промышленность не определится с основным методом создания белого света (который де-факто или де-юре, через международный стандарт, станет доминирующим) говорить о начале работ по стандартизации такого источника, условно названного нами источником типа *L (LED)*, не приходится. Поэтому нам представляется возможным использовать в качестве единого опорного излучения излучение *A* МКО

² Видимо, эта ситуация сложилась из-за того, что метод CQS получил опорные источники излучения по наследству от метода оценки R_a , в котором, как в зеркале, отразилась история развития искусственных источников света. Одними из первых таких источников стали угольные лампы и лампы накаливания, то есть источники излучения близкие по спектральным характеристикам к планковскому излучателю. Поэтому было вполне логично сравнивать их цветопередачу с цветопередачей планковского излучателя. После широкого внедрения люминесцентных ламп семейство опорных источников было дополнено источниками типа *D* (а не только *D65*) и введён калибровочный коэффициент 4,6 в формулу расчёта R_i . В настоящее время в связи с внедрением СДИС наблюдается третья революция в светотехнике.

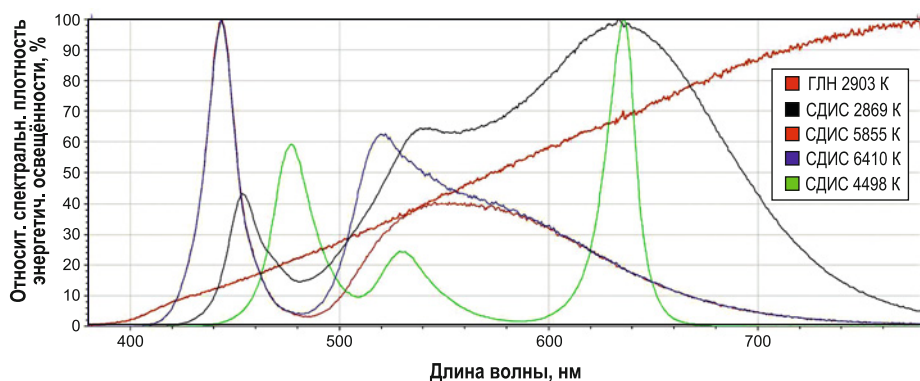


Рис. 4. Относительные спектры излучения опорного и испытуемых светодиодных источников света, установленных в камере визуальной оценки цветопередачи

(воспроизводимое лампой накаливания с КЦТ 2856 К) или излучение D65 (имитирующее свет дневного неба в северном полушарии). По нашему мнению, первое излучение предпочтительнее, поскольку представление наблюдателя о естественности цветов за последние более чем сто лет складывалось под влиянием именно ламп накаливания. Кроме того, излучение D65 ставит вопрос о корректности его применения в местах, где спектральная характеристика дневного неба может значительно отличаться от нормированной (например, в странах Африки и Южной Америки).

Заключение

Анализ результатов многих исследований показал, что действующий метод оценки качества цветопередачи МКО нельзя применять к источникам света со «сложным» спектральным составом. Взамен действующей метрики разными авторами было предложено 7 альтернативных. На основе анализа предложенных метрик нами были отобраны были 5 — по критерию «наличие чёткого алгоритма расчёта показателя качества цветопередачи». Их корректность была нами проверена в экспериментах с участием наблюдателей. Полученные данные показали, что результаты, наиболее близкие к результатам наблюдателей, обеспечивает метрика CQS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирвель И.И. Энергосбережение. Конспект лекций для студентов всех специальностей БГУИР всех форм обучения. — Минск: БГУИР, 2007. URL: http://www.bsuir.by/m/12_100229_1_65369.pdf (дата обращения: 03.03.2015).

2. Кузьминов А.С. Маркировка энергоэффективности как инструмент снижения энергопотребления электробытового оборудования // Энергосберегающие технологии. — 2010. — № 4. — С. 45–50.

3. Лишиук С.И. и др. О светодиодных лампах прямой замены // Светотехника. — 2010. — № 1. — С. 48–54.

4. URL: <http://technologyworld.blog.ru/80642627.html> (дата обращения: 03.03.2015).

5. ГОСТ 23198–94 Лампы электрические. Методы измерения спектральных и цветовых характеристик

6. ТКП 45–2.04–153–2009 Естественное и искусственное освещение. Строительные нормы проектирования.

7. CIE (Commission Internationale de l'Éclairage): Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources. 3ed ed. Publication CIE № 13 (E-1.3.2), 1994.

8. Davis W., Ohno Y. Approaches to color rendering measurement // Journal of Modern Optics. — 2009. — Vol. 56, No. 13. — Cnh 1412–1419.

9. Wood M. CRI and the Color Quality Scale, Part 2. URL: <http://www.mikewoodconsulting.com/articles/Protocol%20Spring%202010%20-%20CRI%20%20CQS.pdf> (дата обращения: 03.03.2015).

10. CIE177:2007. Technical report. Color rendering of white LED light sources.

11. Khanh T.Q., Bodrogi P., Brückner S. Rank-order based description of colour rendering: definition, observer variability and validation. CIE2010 «Lighting Quality & Energy Efficiency», 17.März 2010, Wien. Wien [Conference or Workshop Item], (2010).

12. Hashimoto Yano, Shimizu Nayatani. New method for specifying color-rendering properties of light sources based on feeling

of contrast // Color Research & Application. — 2007. — Vol. 32, No.5. — P. 361–371.

13. Cheng Li, Ming Ronnier Luo, Changjun Li. Assessing Colour Rendering Properties of Daylight Sources Part II: A New Colour Rendering Index: CRI-CAM02UCS. URL: <http://cie2.nist.gov/TC1-69/Leeds/CIE-CLi%202-final.pdf> (дата обращения: 03.03.2015).

14. Szabo F. New Metric on Light Source Colour Quality: Colour Harmony Rendering Index. URL: http://www.create.uwe.ac.uk/norway_paperlist/szabo.pdf (дата обращения: 03.03.2015).

15. Hirohisa Yaguchi, Nanako Endoh, Takayoshi Moriyama, Satoshi Shioiri. Categorical Color Rendering of LED Light Sources / CIE Expert Symposium on LED Light Sources: Physical Measurement and Visual and Photobiological Assessment, 2004

16. Smet, Forment, Hertog, Deconinck, Hanselaer. Validation of a color rendering index based on memory colours / CIE Conference on «Lighting Quality and Energy Efficiency», vol: x035:2010 pages:136–142

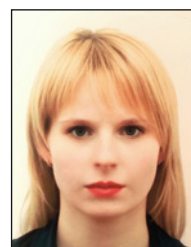
17. Цвет в промышленности. Под ред. Р. Мак-Дональда. М.: Логос, 2002. — 596 с.



Скумс Дмитрий Валентинович,

физик. Окончил в 2006 г. физический факультет Белорусского государственного университета. Учёный-хранитель

национальных эталонов в области фотометрии и колориметрии, Белорусский государственный институт метрологии



Чайкова Любовь Дмитриевна,

инженер. Окончила в 2013 г. факультет приборостроения Белорусского национального технического университета.

Инженер отдела физико-химических и оптических измерений Белорусского государственного института метрологии