

TM-30-15 и общий индекс цветопередачи МКО R_a : исследование цветопередачи белых СД с люминофором¹

К. БИСКЕ^{1,3}, У. ХАРТВИГ¹, К. ШИРЦ¹, А. ВИЛЬМ², К. ХОРСТ²

¹ Технический университет Ильменау, Ильменау, Германия

² Компания OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Регенсбург, Германия

³ E-mail: Karin.Bieske@TU-Ilmenau.de

Аннотация

Проведено исследование цветопередачи (индекса точности воспроизведения цвета (*Fidelity Index*) R_f и индекса цветовой гаммы (*Gamut Index*) R_g из TM-30-15) при использовании двадцати одного СД источника света с люминофорами (ЛСД), имеющими различные значения R_f и R_g . 34 объекта освещали при помощи ЛСД, люминесцентных ламп (ЛЛ) и галогенных ламп накаливания (ГЛН). Цветные объекты располагались одинаковым образом в двух соседних камерах, и участники сравнивали представленные им варианты освещения с освещением лампой сравнения (ГЛН). При оценке качества цвета мнения наблюдателей зависели от обоих показателей. Наблюдалась сильная корреляция между индексом точности воспроизведения и воспринимаемыми цветовым различием и сдвигом цвета и между индексом цветовой гаммы и насыщенностью цвета. По мнению наблюдателей, люминесцентной лампе ($R_f = 80$, $R_g = 100$) лучше всего соответствовали ЛСД с $R_f = 75$, $R_g = 105$ и с $R_f = 80$, $R_g = 105$.

Ключевые слова: цветопередача, СД с люминофором, TM-30-15.

1. Введение

В настоящее время во внутреннем освещении всё чаще используются светодиоды (СД). Вначале белый свет формировался совокупностью разных цветных СД (RGB-СД). Сейчас используются СД с люминофорами (ЛСД). В них излучение синего СД преобразуется люминофором в более длинноволновое излучение. Обычно это преобразование осуществляется смесью люминофоров разного типа, позволяющей получить определённый

спектр излучения СД, который влияет на цветопередачу источника света. Стандартным современным способом оценки цветопередачи является использование индекса цветопередачи МКО R_a , который был предложен МКО в 1995 г. [1]. Однако исследования продемонстрировали несовпадение между оценками, проведёнными по этой методике, с оценками наблюдателей, особенно в случае СД освещения [2], так что эта методика расчётов была усовершенствована с учётом новых достижений в области колориметрии. Кроме того, были оптимизированы спектральные распределения энергии излучения (СРЭИ) новых источников света, например, за счёт использования разных люминофоров, которые в значительной степени влияют на качество цвета. Во всём мире считают, что для описания качества цвета, имеющего множество граней, одного критерия недостаточно, и в 2015 г. Североамериканское светотехническое общество опубликовало технический меморандум TM-30-15, содержащий новый способ оценки цветопередачи белых источников света [3]. TM-30-15 учитывает как точность воспроизведения цвета (*colour fidelity*), оцениваемую при помощи индекса точности воспроизведения цвета (*Fidelity Index*) R_f , так и цветовую гамму, оцениваемую при помощи индекса цветовой гаммы (*Gamut Index*) R_g , что позволяет охватить координаты цветности, соответствующие 16-ти бинам цветового тона (*hue bins*). В [4] было показано, что чем шире цветовая гамма, тем лучше цветоразличение, так как при этом координаты цветности разнесены в цветовом пространстве на большее расстояние. Были также высказаны предположения, что в случае источника света с большей цветовой гаммой цвета воспринимаются как бо-

лее насыщенные, более яркие и более естественные [5], и что размер охватываемой области пропорционален максимально возможному количеству цветов, которые могут быть представлены [6]. RGB-СД являются примерами СД с узкими СРЭИ. Они могут иметь большие значения индекса цветовой гаммы, но при этом воспроизведение определённых цветов может быть неточным. Поэтому имеет смысл использовать оба показателя.

В [7] описаны результаты предварительных исследований СД освещения, проведённых в лабораторных условиях с использованием цветных объектов. Освещение обеспечивалось белым светом с разными значениями R_f и R_g , создаваемым семью типами регулируемых цветных СД. В результате был сделан вывод, что наблюдатели предпочитают СД источники света с $R_f > 75$ и $R_g \geq 100$. В данной работе этот результат проверяется применительно к ЛСД.

2. Тема исследования и гипотезы

Считается, что белые ЛСД удовлетворяют требованиям, сформулированным в [7], и что существует высокая степень корреляции между значениями R_f и R_g , введёнными в TM-30-15, и субъективными оценками наблюдателями разных аспектов цветопередачи. В данной работе рассматривается возможность улучшения оценки цветопередачи ЛСД с одинаковыми значениями индекса цветопередачи МКО R_a , для чего используются субъективные оценки, проведённые применительно к ЛЛ.

3. Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента

Использовались две примыкающие друг к другу камеры с двумя отделениями каждая, в одном из которых располагался осветительный блок с рассеивателем, а в другом – исследуемые объекты (рис. 1а). В одной камере в качестве источников света использовались ГЛН *SoLux* и ЛЛ *OSRAM Sylvania* с $R_a = R_f = 80$ и $R_g = 100$, а также три типа синих СД и семь ЛСД с разными синими и красными люминофорами. Сочетая различные СД, можно было формировать разные СРЭИ, такие же, как и у белых ЛСД. Были проведены сравнительные исследования

¹ По материалам доклада на конгрессе *Lux Europa-2017*.

Перевод с англ. Е.И. Розовского.

Рис. 1. а) Экспериментальная установка с двумя камерами (ширина 46 см, глубина 48 см, высота 96 см). Вверху расположен осветительный блок, закрытый занавеской или открытый, а внизу – исследуемые объекты. б) Относительные спектральные распределения энергии излучения источников света (*B* – синий СД, *P* – СД с люминофорами и полным преобразованием излучения, *ref* – лампа сравнения (галогенная лампа накаливания *SoLux THL*), *THL* – галогенная лампа накаливания *SoLux*, *FL* – люминесцентная лампа *OSRAM Sylvania*)

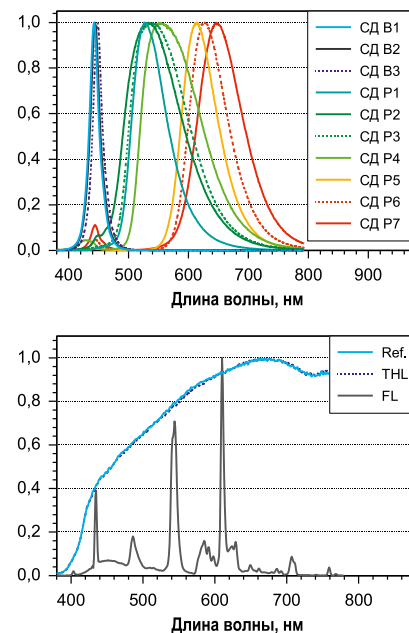
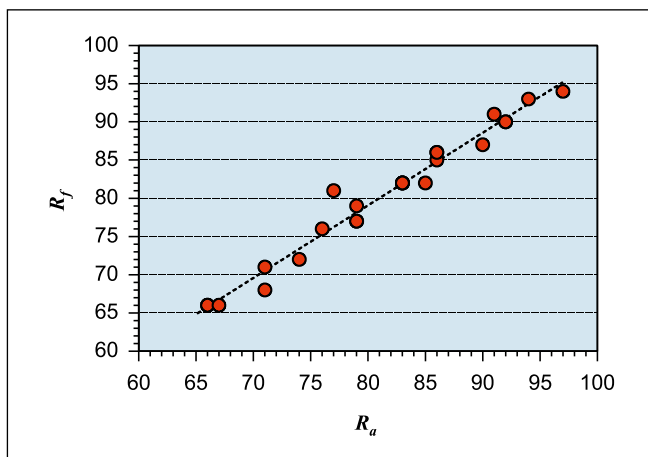


Рис. 2. Корреляция между значениями R_a и R_f , коэффициент детерминации $R^2 = 0,98$



как 21-ой комбинации СД с R_f в интервале от 66 до 94 и R_g в интервале от 92 до 114, так ЛЛ и ГЛН. В качестве лампы сравнения использовалась расположенная во второй камере ГЛН *SoLux* с $R_f = R_g = 100$. В камере сравнения обеспечивалось постоянство цвета источника света (коррелированная цветовая температура $T_u = 3800$ К) и уровня освещённости E в центре пола камеры ($E = 400$ лк). При создании этой экспериментальной установки учитывалось то обстоятельство, что и индекс цветопередачи МКО R_a , и $TM-30-15$ основаны на сравнительных оценках. Относительные СРЭИ источников света приведены на рис. 16.

Значения R_a почти совпадают со значениями R_f , отличаясь, в среднем, лишь в одном знаке из четырёх максимум. Коэффициент детерминации для использовавшихся условий освещения был равен $R^2 = 0.98$ (рис. 2).

Совокупности одинаковых цветных объектов были идентичным образом размещены в обеих камерах. Выбор объектов обеспечивал охват широкого диапазона цветового тона, насыщенности и светлоты. Координаты цветности объектов приведены на рис. 3. Это были объекты, встречающиеся в повседневной жизни: растения, пищевые продукты, потребительские товары, канцелярские принадлежности и печатная продукция, а также карта цветов. СРЭИ выбранных комбинаций СД и соответствующие сочетания R_f и R_g приведены на рис. 4.

В проведении исследований приняли участие 34 человека в возрасте от 23 до 48 лет, из них 10 женщин. Они заполняли вопросники (рис. 5), вначале давая оценку цветопередачи при одновременном наблюдении обеих камер. При этом они оценивали различия в воспринимаемых цветах

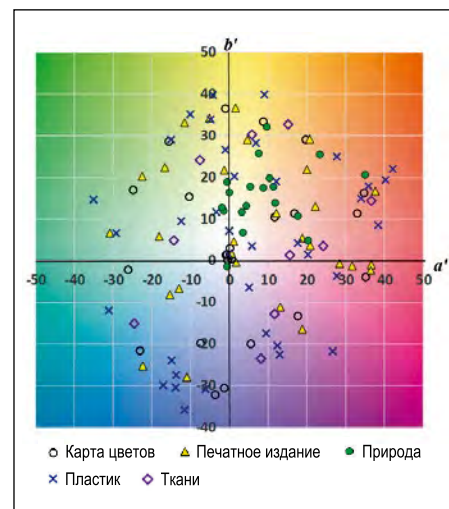


Рис. 3. Координаты цветности исследованных объектов в пространстве CAM02-UCS МКО при освещении их излучателем Планка с $T_u = 3800$ К

объектов, освещаемых исследуемыми источниками света и лампой сравнения, исходя при этом из цветового различия (*CD*), насыщенности (*S*), воспринимаемой светлоты (*PB*), температуры (*T*), сдвига цвета (*CS*), привлекательности (*LA*) и естественности (*NN*). Кроме того, наблюдателей спрашивали, какие из цветов объектов соответствуют их ожиданиям (*EP*), и как они оценивают качество цвета объектов в целом (*CQ*), безотносительно к цвету объектов сравнения.

Различные варианты освещения реализовывались случайным образом. Для четырёх вариантов исследования проводились повторно. Средние значения и доверительные интерва-

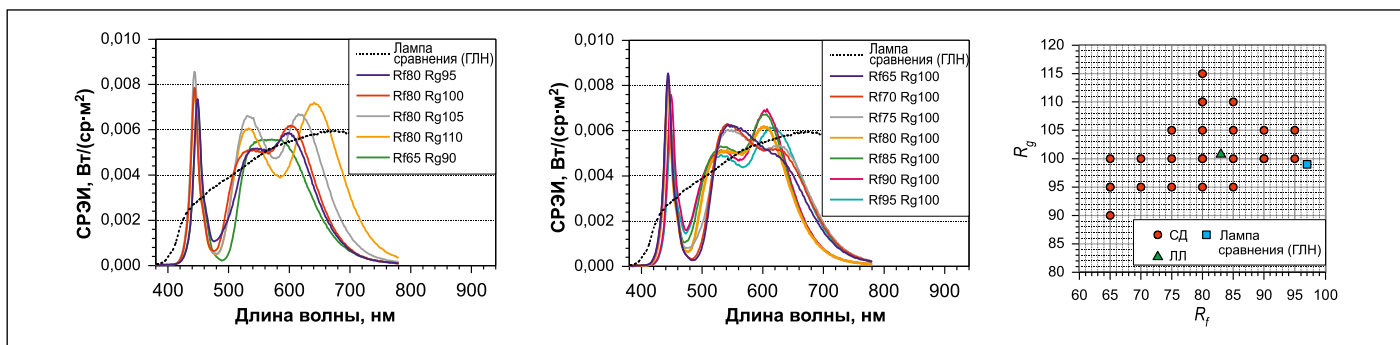


Рис. 4. Слева и в центре: спектры выбранных вариантов освещения. Справа: все использовавшиеся при проведении исследований образцы

Воспринимаете ли Вы цветовое различие между объектами в левой и правой камерах?					
Цветовое различие (CD)	1 = отсутствует	2 = маленькое	3 = среднее	4 = большое	5 = очень большое
Как Вы оцениваете цвета объектов в левой камере по сравнению с цветами объектов в правой камере?					
Насыщенность (S)	1 = очень насыщенный	2 = несколько насыщенный	3 = различий нет	4 = несколько ненасыщенный	5 = очень ненасыщенный
Воспринимаемая светлота (PB)	1 = очень светлый	2 = несколько светлее	3 = различий нет	4 = несколько темнее	5 = очень тёмный
Температура (T)	1 = очень тёплый	2 = несколько теплее	3 = различий нет	4 = несколько холоднее	5 = очень холодный
Сдвиг цвета (CS)	1 = нет	2 = маленький	3 = умеренный	4 = большой	5 = очень большой
Привлекательность (LA)	1 = намного приятнее	2 = несколько приятнее	3 = различий нет	4 = несколько менее приятный	5 = намного менее приятный
Естественность (NL)	1 = очень естественный	2 = несколько естественнее	3 = различий нет	4 = несколько менее естественный	5 = очень неестественный
В какой из камер цвета объектов лучше соответствуют Вашим ожиданиям?					
Ожидания (EP)	1 = в левой	2 = в правой	3 = в обеих	4 = ни в одной	
Если проигнорировать правую камеру, то как Вы оцениваете качество цвета объектов в левой камере?					
Качество цвета (CQ)	1 = очень хорошее	2 = хорошее	3 = среднее	4 = плохое	5 = очень плохое

Рис. 5. Вопросник

Таблица 1

Коэффициент детерминации R^2 линейной регрессии

Величина	R^2 для R_a	R^2 для R_f	R^2 для R_g	R^2 для CQ
Качество цвета (CQ)	0,62	0,65	0,73	1,00
Цветовое различие (CD)	0,80	0,79	0,13	0,58
Насыщенность (S)	0,25	0,29	0,95	0,77
Сдвиг цвета (CS)	0,77	0,77	0,33	0,79
Воспринимаемая светлота (PB)	0,01	0,01	0,41	0,17
Температура (T)	0,55	0,63	0,06	0,52
Привлекательность (LA)	0,32	0,36	0,91	0,85
Естественность (NN)	0,61	0,62	0,70	0,92

лы ($CI_{95\%}$) рассчитывали с учётом как ответов участников, так и параметров R_a , R_f и R_g . Коэффициент детермина-

ции (R^2) был получен применительно к аппроксимирующей прямой, проведённой через средние значения оце-

нок. Для сравнения СД источников света и ЛЛ были проведены дисперсионный и ретроспективный анализы.

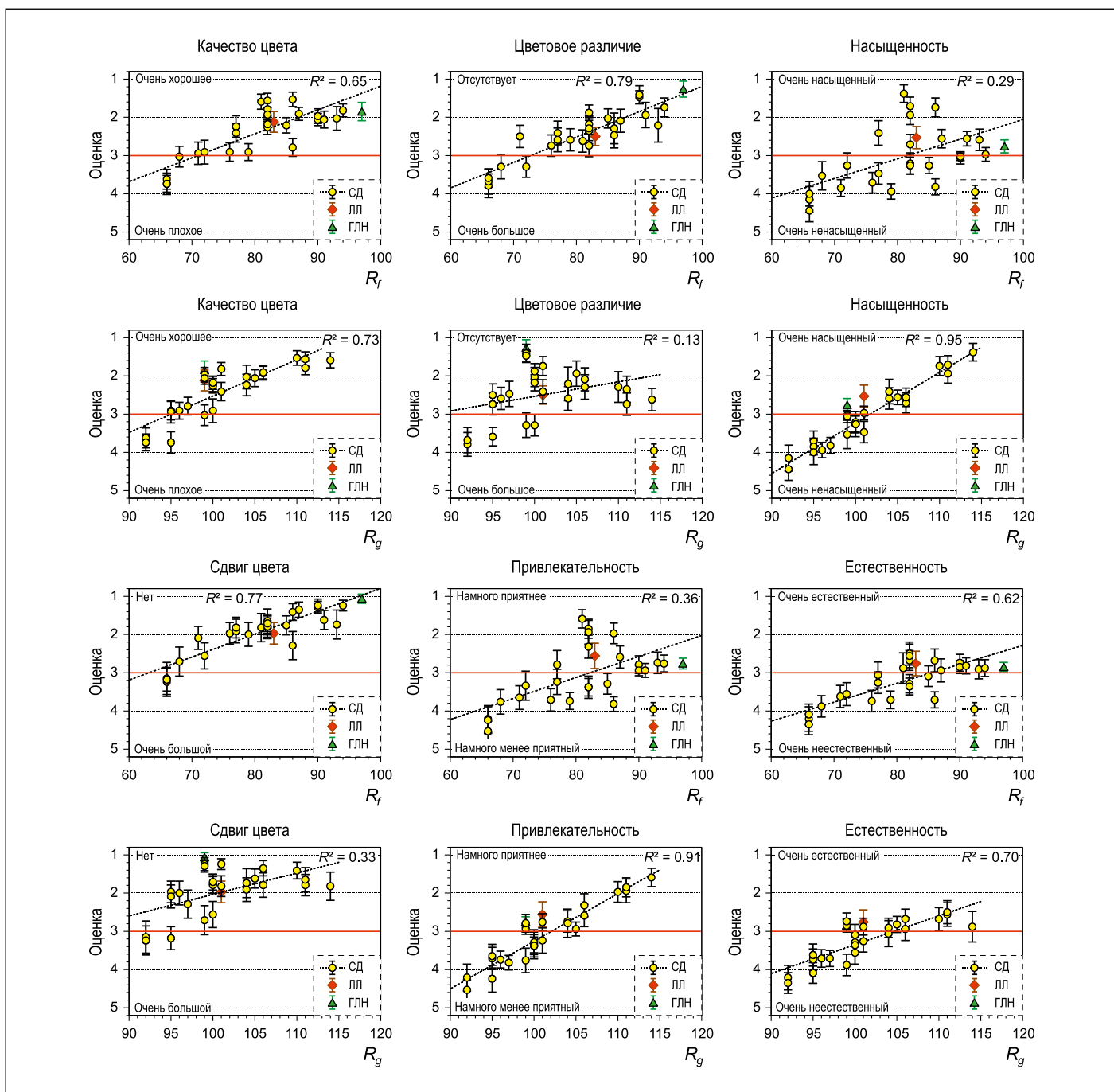


Рис. 6. Субъективные оценки (средние значения и доверительные интервалы) ($CI_{95\%}$) для R_f и R_g . Аппроксимирующие прямые были проведены для всех оценок СД освещения. Соответствующие значения коэффициента детерминации R^2 приведены на рисунке

4. Результаты

На рис. 6 приведены графики, обобщающие полученные результаты. Указаны усреднённые значения оценок, сделанных всеми участниками ($N = 34$), а «усы» соответствуют доверительными интервалам.

Из графиков и коэффициентов детерминации для линейной регрессии R^2 , приведённых на рис. 6, и из табл. 1 следует, что субъективная оценка качества цвета представляет собой многомерную задачу, и что большое зна-

чение имеют оба показателя: и R_f , и R_g . Если значение R_f хорошо описывает цветовое различие, сдвиг цвета и восприятие цвета, как более тёплого или более холодного по сравнению с имеющим место при освещении лампой сравнения, то значение R_g точно отражает оценку насыщенности. Привлекательность освещения сильно зависит от того, насколько насыщенными выглядят цвета. Для оценки естественности важны оба показателя. При постоянстве R_f ЛСД обеспечивают тем

большую привлекательность и насыщенность цвета, чем выше, до определённого предела, значение R_g . При увеличении R_g субъективная оценка цветопередачи улучшается. Индекс точности воспроизведения цвета R_f очень сильно коррелирует с индексом R_a МКО, так что эти показатели взаимозаменяемы. Ответы на вопрос об оправдании ожиданий в части цветов объектов, наблюдаемых при освещении исследуемыми источниками света и лампой сравнения, приведены на рис. 7 слева. На диаграмме приведена абсолютная частота, с которой

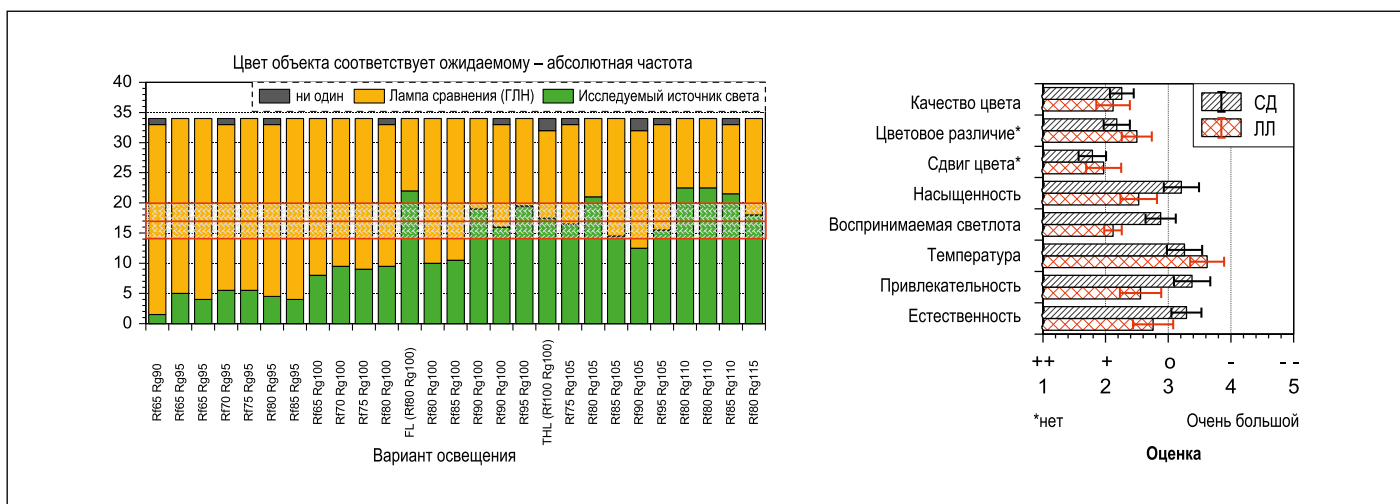


Рис. 7. Слева: абсолютная частота ответов, что цвета объектов соответствуют ожидаемым. Справа: ответы, относящиеся к СД ($R_f = 80, R_g = 100$) и ЛЛ ($R_f = 80, R_g = 100$); средние значения и доверительные интервалы ($C_{95\%}$), $N = 34$

Таблица 2

Сводка результатов сравнения СД и ЛЛ (приведены значения вероятности p ; статистически значимые результаты отмечены курсивом)

R_g	95			100					105			
	75	80	85	75	80	85	90	95	75	80	85	
Качество цвета (CQ)	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
Цветовое различие (CD)	1,000	1,000	1,000	1,000	0,082	0,277	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	1,000	1,000	0,622	
Сдвиг цвета (CS)	1,000	1,000	0,910	1,000	1,000	1,000	<i>0,000</i>	<i>0,002</i>	1,000	1,000	<i>0,030</i>	
Насыщенность (S)	0,000	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	<i>0,002</i>	<i>0,037</i>	0,303	1,000	1,000	1,000	
Привлекательность (LA)	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	<i>0,026</i>	<i>0,000</i>	<i>0,009</i>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
Естественность (NN)	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	0,185	<i>0,036</i>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
Заключение	ЛЛ существенно лучше			СД существенно лучше					Нет существенных различий			

наблюдаемые цвета объектов соответствуют ожиданиям. Ответы давались относительно того, справедливо ли это для одного из вариантов освещения в одной из камер (экспериментальной или сравнения), для обоих вариантов или ни для одного. Ответы «оба варианта» были разделены между освещением исследовавшимся источником света и освещением лампой сравнения.

Как показано на графике, если у исследовавшихся СД источников света значения показателей составляли $R_f < 90$ и $R_g \leq 100$, то цвета объектов были не лучше ожидаемых. СД источники света с $R_f \geq 80$ и $R_g = 110$ оценивались выше, чем лампа сравнения. Исследовавшаяся ЛЛ ($R_f = 80,$

$R_g = 100$) оказалась гораздо предпочтительнее лампы сравнения, и оценивалась выше, чем СД источники света с теми же самыми значениями R_f и R_g .

В табл. 2 приведена сводка результатов сравнительной оценки СД источников света и ЛЛ ($R_f = 80, R_g = 100$). В таблице приведены значения вероятности p при статистической значимости $\alpha = 0,05$. При одних и тех же значениях R_f и R_g , общее качество цвета оценивалось одинаково, тогда как цвета объектов воспринимались как менее насыщенные, менее естественные и менее привлекательные, чем под светом ЛЛ (рис. 7, справа). Нет никаких существенных отличий между оценками, проведенными применительно к СД освещению с $R_f = 75,$

$R_g = 105$ и с $R_f = 80, R_g = 105$, и оценками, проведенными применительно к ЛЛ. Это позволяет предположить, что небольшие различия в R_f уравниваются небольшим увеличением насыщенности.

5. Выводы

Цвет объекта (при сопоставлении его с цветом облучаемого лампой сравнения объекта) нельзя считать более привлекательным только исходя из значения индекса точности воспроизведения R_f . Этот индекс, равно как и индекс цветопередачи МКО R_a , служит для описания различий цветов только применительно к цветовому облику при сопоставлении с ос-

вещаемым лампой сравнения объектом. А это означает, что критерием для оценки всегда будет спектр лампы сравнения. При этом никто не говорит о том, под воздействием какого света – исследуемого источника или лампы сравнения – цветовой облик лучше. Имеет смысл использовать для оценки как индекс точности воспроизведения цвета, так и индекс цветовой гаммы, и обозначить задачи, которые следует решить при разработке источников света. Результаты данного исследования говорят о том, что полезным было бы следующее нормирование индексов: $R_f \geq 80$ и $R_g \geq 100$. Воспринимаемая естественность цвета объекта связана как с R_f , так и с R_g , так как в этом отношении наблюдатели оценивали варианты освещения с $R_f \geq 80$ и $R_g \geq 100$ как равноценные освещению лампой сравнения или более хорошие. Полученные результаты согласуются с [7]. Высокая корреляция между значениями R_a и R_f (рис. 1) говорит о том, что полученные экспериментальные данные применимы и к индексу цветопередачи R_a .

Огромный вклад в создание экспериментальной установки и проведение исследований внесла компания OSRAM Opto Semiconductors GmbH H.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. CIE Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources. CIE13.3, 1995.
2. Narendran, N., Deng, L. Color Rendering Properties of LED Light Sources // Proc. of SPIE.– 2002. – Vol. 4776. – P. 61–67.
3. IES TM-30–15. IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition/ Illuminating Engineering Society of North America, 2015.
4. Thornton, W.A. Color-discrimination index // J. Opt. Soc. Am.– 1972. – Vol. 62, No. 2. – P. 191–194.
5. Rea, M.S., Deng, L., Wolsey, R. Light Sources and Color // NLRIP Lighting Answers (Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY).– 2004. – Vol. 8, No. 1.
6. Xu, H. Color-rendering capacity of illumination // J. Opt. Soc. Am.– 1983. – Vol. 73, No. 12. – P. 1709–13.
7. Royer, M.P., Wilkerson, A., Wei, M., Houser, K., Davis, R. Human perceptions of colour rendition vary with average fidelity, average gamut, and gamut shape // Lighting Res. Technol.– 2016. – No. 0. – P. 1–26.



Карин Биске (Karin Bieske), Dr.-Ing. Научный сотрудник светотехнической группы Технического университета Ильменау. Активно участвует в работе ассоциаций

и комиссий в области освещения, цвета и стандартизации

Улла Мария Хартвиг (Ulla Maria Hartwig), М. Сс. Область научных интересов: цветопередача СД источников света



Кристоф Ширц (Christoph Schierz), Prof., Dr. Руководитель светотехнической группы Технического университета Ильменау. Член президиумов различных профессиональных объединений, активно участвует

в работах в области стандартизации, проводимых Немецким институтом стандартов, Европейским комитетом по стандартизации и МКО. Область научных интересов: использование света и цвета на рабочих местах с учётом физиологических характеристик глаза



Александр Вильм (Alexander Wilm). Окончил Регенсбургский университет прикладных наук (2004 г.). Старший эксперт в области освещения отдела общего освещения

компании OSRAM Opto Semiconductors GmbH H. Участвует в работе нескольких экспертных организаций в области общего освещения и внедрения СД освещения



Каролин Хорст (Carolin Horst), М. Сс. Эксперт по качеству света компании OSRAM Opto Semiconductors GmbH H.

Георгий Боос – «Персона года 2017»

Президент Международной светотехнической корпорации «БООС ЛАЙТИНГ ГРУПП» (BL Group), заведующий кафе-



дрой «Светотехника» НИУ «МЭИ», председатель отраслевого НТС «Светотехника» и редколлегия журнала «Светотехника» Георгий Боос был признан персоной года 2017 на Евразийской Светотехнической Премии «Золотой Фотон». Профессиональное сообщество оценило его огромный вклад в развитие отечественной светотехнической отрасли и формирование научного сообщества в области светотехники и проголосовало за Георгия Бооса большинством голосов.

МСК «БООС ЛАЙТИНГ ГРУПП» также лидировала по пяти позициям – «Прорыв года», «Лучшая маркетинговая кампания года», «Улично-дорожное освещение», «Накладной светильник для внутреннего освещения» и «Продукт года» (в подноминации «Светодиодная панель, встраиваемая в потолок, типа «Армстронг»).

Евразийская Светотехническая Премия «Золотой Фотон» – это главная награда в светотехнической отрасли. Она призвана поощрять достижения компаний в разработке уникальной продукции, реализации значимых проектов, а также отмечать заслуги талантливых предпринимателей, формирующих светотехническую отрасль стран Евразийского экономического сообщества (ЕврАзЭС).

bl-g.ru
22.02.2918