

Исследование эффекта «приукрашивания» цвета разноспектральными излучениями

С. М. ЛЕБЕДКОВА¹, Ю. А. ЛУЗИНА

ФГОУ ВПО «НИУ «МЭИ», Москва

Аннотация

Изучены методы оценки качественных и количественных характеристик ощущения цвета. Проведён анализ предлагаемых методов освещения цветных объектов с целью их «приукрашивания». Создана экспериментальная установка и проведены визуальные эксперименты по оценке эффекта «приукрашивания» цветных образцов. Проведён расчет насыщенности и светлоты цветных образцов при освещении разноспектральными излучениями. Определены спектры излучений, «приукрашивающих» разные группы цветных образцов.

Ключевые слова: светодиоды, эффект «приукрашивания», цветные образцы,

Введение

Одна из важнейших характеристик современных источников света (ИС) – качество воспроизведения цвета (цветопередача) освещаемых объектов. Цветопередача характеризует влияние спектрального состава излучения рассматриваемого ИС на передачу цвета объектов по сравнению с их цветом при освещении эталонным ИС. Во всём мире её принято оценивать общим индексом цветопередачи R_a , который рекомендуется МКО. Практика применения люминесцентных ламп (ЛЛ) при освещении многоцветных интерьеров показала следующее. ЛЛ белого света с одной коррелированной цветовой температурой $T_{ки}$ и близкими значениями R_a , но с разным характером спектра излучения, могут усиливать или ослаблять некоторые цвета. Это выражается в увеличении или уменьшении насыщенности или светлоты цвета. С точки зрения цветопередачи это плохо, т. к. цвет искажается по сравнению с эталоном. Но усиление цвета, его насыщенности, делает объект бо-

лее привлекательным и нравится наблюдателю. Свойством «приукрашивания» цвета обладают современные светодиоды (СД), а также ЛЛ с трёх- и четырёхполосными люминофорами. Как правило, R_a их не столь высок, а частные индексы цветопередачи бывают низки. Опыт применения ЛЛ, при освещении которыми те или иные цвета объектов будут казаться нам ярче, красивей, сочнее, уже есть. Так, в Германии выпускают ЛЛ для освещения мяса (чтобы оно казалось покупателям свежим, красивым), рыбы, фруктов и овощей. Но свои разработки там держат в секрете и мало что публикуют.

Цвет предмета определяется характером его спектра отражения. Чем ярче выражен цвет предмета, тем этот спектр уже: помидор отражает преимущественно красные лучи, апельсин – оранжевые и жёлтые, а белая бумага – весь спектр падающего на неё белого света. Таким образом, чтобы цветные объекты казались «приукрашенными», необходимо, чтобы максимум в спектре ИС приходился на диапазон длин волн, соответствующих максимумам спектрального коэффициента отражения этих объектов. При этом излучение ИС должно оставаться белым, чтобы его можно было использовать для общего освещения и создавать комфортные условия для длительного пребывания людей.

С появлением СД проблема нахождения такого спектра излучения, очевидно, стала более разрешима.

Эффект «приукрашивания» может находить разное применение. В частности, в торговле (для привлечения внимания к определённым группам товаров или оформления витрин с выставленными товарами определённых цветов). Следует ещё раз отметить, что речь идёт не о цветном освещении, а о применении ИС белого света, позволяющими делать объекты ярче и выразительней.

Кондитерские изделия и выпечку рекомендуется освещать ИС с низкой

$T_{ки}$. Освещение замороженных продуктов лучше производить ЛЛ с $T_{ки}$ 4000–6500 K и $R_a \geq 85$. Для освещения мясной продукции нередко применяют лампы специального спектра, подчеркивающие натуральные красные и розовые цвета. Овощные и фруктовые секции принято освещать светильниками типа «колокол» или прожекторами направленного света с МГЛ с керамической горелкой.

Для усиления цвета и создания привлекательности продукции разного вида могли бы применяться СД ИС с соответствующим спектром излучения. Для освещения многоцветных объектов, как правило, применяют ИС с $R_a > 90$, чтобы как можно точнее передавать цвета продукции, имеющей разное спектральное отражение. Компанией *Martini Light HD RETINA LED* предложена новая технология, как раз направленная на освещение разноцветных объектов и придания им насыщенного, яркого оттенка.

Целью настоящей работы являлось определение характера спектров излучения СД, создающих эффект «приукрашивания» цветных объектов, при константности восприятия белого цвета.

Разработка и создание экспериментальной установки

В настоящей работе требовалось смоделировать спектр СД ИС, при котором цветные объекты по ощущениям экспертов казались бы красивей и ярче по сравнению с тем же при стандартном освещении. Необходимо было оценить и степень комфортности «приукрашивания». Поэтому была создана установка, моделирующая разные спектры излучения СД и разные условия освещения цветных объектов. В основу была положена модель, предложенная в работе [1]. Экспериментальная установка содержала ИС, осветительный прибор, устройство управления (УУ) и адаптометр.

ИС моделировался набором СД, что позволяло создавать спектры белого излучения, соответствующие разным, в частности, $T_{ки}$ и R_a . Использовались цветные СД серии *XP-E* компании *CREE – Royal Blue* (3 шт.), *Green* (8 шт.), *Amber* (29 шт.) и *Red* (8 шт.).

Осветитель имел вид металлического прямоугольного параллелепипеда с размерами 350×350×150 мм

¹ E-mail: lebed1200@yandex.ru



Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки

и был покрыт внутри листами белого микропористого полиэтилентерефталата (МСПЕТ) с высокими отражающими свойствами производства компании *Furukawa*. Крышка, к которой прикреплялись СД, была выполнена

из алюминиевого сплава толщиной 3 мм, что обеспечивало эффективный теплоотвод. В качестве материала рассеивателя было выбрано матированное оргстекло.

Для должного функционирования осветителя использовалось УУ («драйвер») компании *Rainbow Electronics*. Для управления потоком излучения СД применялась плата *P-CPU-AT-RS485-P130x46-RT007*, переводящая цифровой 8-битный сигнал, устанавливаемый на монохроматическом экране, в сигнал ШИМ, подающийся на каждый канал УУ.

В качестве материала адаптационной камеры использовалась фанера толщиной 12 мм. Размеры конструкции – 760×500×500 мм. Для обеспечения условия неселективности отражения и равномерности освеще-

ния цветных образцов, помещённых в адаптометр, его внутренняя поверхность была выкрашена белой матовой краской. На рис. 1 представлена адаптационная камера с осветителем.

Экспериментальная установка позволяет изменять спектральный состав излучения путём диммирования светового потока цепочек цветных СД. При этом свет остаётся белым (с небольшим оттенком). Это даёт возможность освещать цветные объекты, помещённые в адаптометр, излучением, которое создаёт эффект усиления цвета.

В качестве объектов наблюдения были выбраны насыщенные цветные образцы МЭИ (18 шт.). Они размещались на сером фоне с коэффициентом отражения 0,5 (во избежание большого контраста с поверхностью адаптометра, имеющей коэффициент отражения 0,7).

Световой поток СД диммировался с помощью компьютерной программы «*Python*». Она позволяла задавать сигналы соответствующих составляющих *R*, *G*, *B* и *A* (от 0 до 255) и получать разные варианты спектра излучения.

На вертикальной плоской поверхности, где располагались объекты наблюдения, была выбрана освещённость 500 лк, которая при любых вариантах спектра поддерживалась постоянной.

Усиление цвета объектов разной тональности создавалось повышением доли излучения в спектре эталонного ИС в диапазоне длин волн, соответствующем этой тональности. В качестве эталонного ИС, с которым можно было бы непосредственно сравнивать исследуемый, использовалась модель ИС типа «*A*», с $T_{ки} \approx 2800 K$, созданная на базе четырёх указанных выше СД. Управляющие сигналы, задававшиеся с помощью программы «*Python*» для эталонного ИС, характеризуются в табл. 1.

Опытным путём были подобраны спектры излучений СД в красной, жёлтой, синей и зелёной областях, которые вызывали недопустимое усиление цвета. Диапазон от спектра эталонного ИС до спектра, вызывавшего недопустимое усиление цвета, был разделён на пять участков. В итоге мы получили 6 точек, то есть по 6 излучений СД ИС для каждой из групп цветных образцов (красные, жёлтые, синие и зелёные образцы).

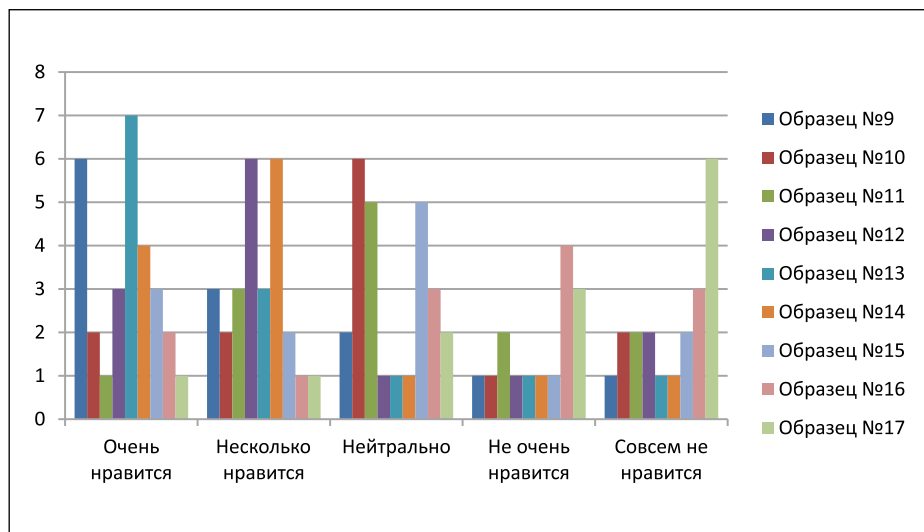


Рис. 2. Гистограмма субъективных оценок сопоставления цвета красно-жёлтых образцов при освещении лампой накаливания и светодиодным эталонным источником

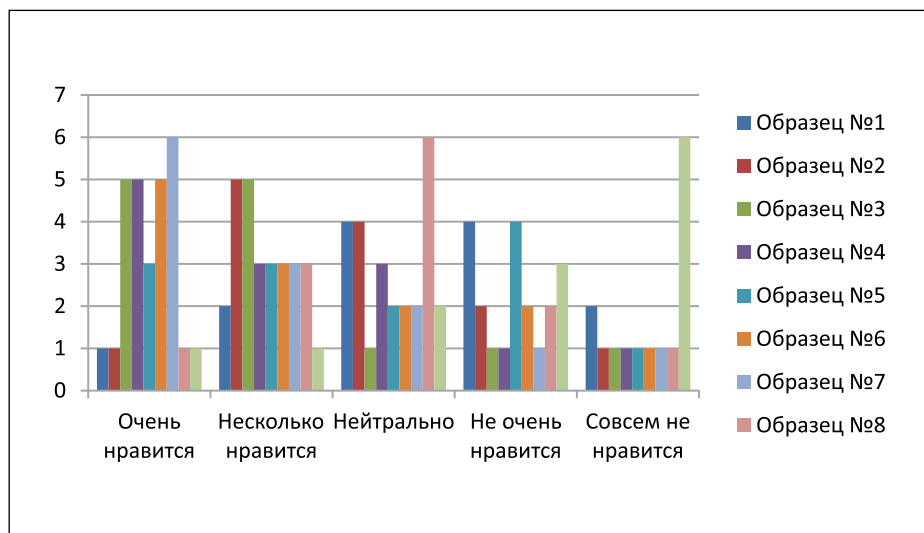


Рис. 3. Гистограмма субъективных оценок сопоставления цвета сине-зелёных образцов при освещении лампой накаливания и светодиодным эталонным источником света

Проведение эксперимента

Экспериментальная часть работы состояла из двух этапов. Вначале следовало оценить по 5-балльной шкале степень привлекательности красно-жёлтых и затем сине-зелёных образцов МЭИ при переходе от освещения лампой накаливания к освещению смоделированным СД ИС с $T_{цв}$ 2800 К. Отдельно проводились эксперименты с наблюдением красно-жёлтых образцов, а затем сине-зелёных. Соответственно, были построены гистограммы по оценке красно-жёлтых (рис. 2) и сине-зелёных (рис. 3) цветных образцов МЭИ. По оси абсцисс отложена категорийная оценка образцов, а по оси ординат – количество наблюдателей. Согласно полученным результатам, смоделированный СД ИС имеет достаточно светового потока в синей, зелёной и жёлтой частях спектра, а вот в красной его недостаточно, из-за чего бордовый и пурпурный образцы темнеют и теряются. Спектр эталонного СД ИС приведён на рис. 4 (чёрный пунктир).

Вторая часть экспериментов была направлена на нахождения излучений СД ИС, которые бы «приукрашивали» те или иные цветные объекты. Поэтому проводились наблюдения уже отдельно с красными, жёлтыми, синими и зелёными образцами МЭИ (т.к. требовалось дать рекомендации по освещению объектов конкретных оттенков). Оценка степени «приукрашивания» проводилась по бинарной системе оценки стимула – «плюс» и «минус», которая была реализована по методу предъявлений.

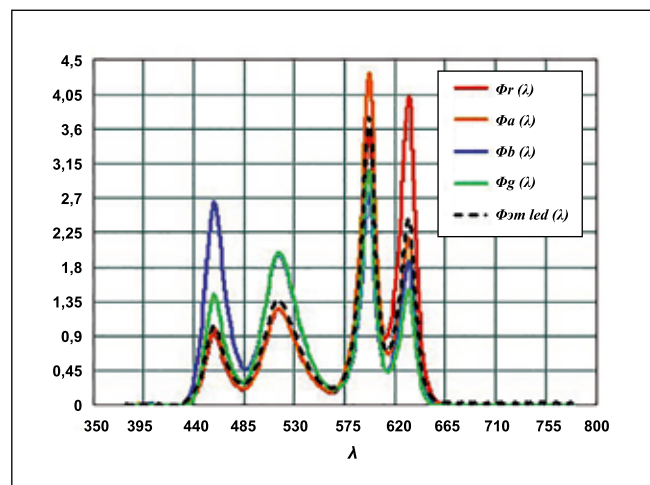
Оценку «плюс» наблюдатель давал такому излучению, при котором цветные образцы становились бы ярче, насыщеннее, «чище», более «пылающими» и выделяющимися по сравнению со смоделированным эталонным излучением. При этом белый фон адаптометра воспринимался белым, а кожа человека слабо меняла свой цвет. Соблюдение этого условия позволяет в дальнейшем рекомендовать полученные в экспериментах спектры как для акцентного освещения конкретных объектов, так и для общего освещения.

Оценкой «минус» оценивалось такое излучение, при котором цветные образцы имели «грязный» оттенок, не выделялись и не являлись очень насыщенными. Или же, наоборот, такое из-

Уровни диммирования 4-х сигналов светодиодного источника света при моделировании лампы накаливания с $T_{цв}$ 2800 К

| Уровни диммирования компонент СД ИС | Компоненты СД ИС | | | |
|-------------------------------------|------------------|-----|-----|----|
| | B | G | A | R |
| | 60 | 115 | 100 | 65 |

Рис. 4. Спектры «приукрашивающих» красного, жёлтого, синего, зелёного и эталонного светодиодных излучений



лучение, при котором образцы были настолько яркие и насыщенные, что вызывали дискомфорт, а цвет кожи человека становился неприемлемым (цветным). Согласно работе [2], распределение ответов в этом случае можно аппроксимировать нормальным законом Гаусса, что позволяет обрабатывать результаты экспериментов статистическими методами.

Как упомянуто выше, было получено по 6 излучений для каждой группы образцов МЭИ, которые предъявлялись испытуемому по 5 раз в произвольном порядке, что должно было исключить угадывание. Наблюдатель должен был ответить, усиливает ли смоделированное излучение цвет образцов по сравнению с эталонным. Сравнение осуществлялось по памяти. Эталонный вариант освещения предъявлялся испытуемому наравне с остальными излучениями. Ответы наблюдателя заносились в протокол визуальных оценок. В нём также указывались номера образцов, которые больше всего понравились наблюдателю при освещении наилучшим, по оценкам, излучением.

Статистическая обработка ответов наблюдателей во второй части эксперимента проводилась пробит-методом [3] на основе данных протоколов визуальных оценок. Согласно этому методу были получены значения стимулов, соответствующих 50%-

ной вероятности обнаружения эффекта «приукрашивания» и средних квадратических отклонений этой величины. По этим данным были рассчитаны средние взвешенные уровни стимула и дисперсии. Таким образом, для эффекта «приукрашивания» при освещении красных образцов следует выбирать красное «излучение № 3», при освещении жёлтых – жёлтое «излучение № 2», синих – синее «излучение № 3» и зелёных – зелёное «излучение № 3».

Расчёт цветовых характеристик излучений и освещаемых объектов

Измерение спектров «приукрашивающих» излучений проводилось с помощью монохроматора МДР-206 с числом штрихов 1200 на 1 мм (полученные спектры приведены на рис. 4).

Были рассчитаны координаты цвета и цветности излучений, и затем отмечены на цветовой диаграмме XYZ вместе с допусками на белое излучение в виде эллипсов. При этом цветность исследуемых излучений находится за пределами допусков на белое излучение для ЛЛ. Тем не менее во время экспериментов испытуемые не наблюдали сильного искажения белого фона и цвета кожи руки.

По полученным данным были рассчитаны цветовые характеристики

Значения насыщенности (H) и светлоты (B) для красных и жёлтых образцов

| R излучение | | | | | | | | |
|---------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|
| № образца | $H_{\text{граф_эт}}$ | $H_{\text{граф_ис}}$ | $H_{\text{CIE LAB_эт}}$ | $H_{\text{CIE LAB_ис}}$ | $H_{v_K v_3 v_C_эт}$ | $H_{v_K v_3 v_C_ис}$ | $B_{\text{эт}}$ | $B_{\text{ис}}$ |
| 13 | 86 | 82 | 93 | 106 | 191 | 158 | 318 | 342 |
| 14 | 95 | 94 | 76 | 91 | 368 | 313 | 228 | 256 |
| 15 | 93 | 99 | 63 | 80 | 528 | 456 | 171 | 197 |
| 16 | 83 | 90 | 52 | 67 | 656 | 586 | 139 | 158 |
| 17 | 68 | 80 | 37 | 52 | 939 | 856 | 96 | 98 |
| A излучение | | | | | | | | |
| № образца | $H_{\text{граф_эт}}$ | $H_{\text{граф_ис}}$ | $H_{\text{CIE LAB_эт}}$ | $H_{\text{CIE LAB_ис}}$ | $H_{v_K v_3 v_C_эт}$ | $H_{v_K v_3 v_C_ис}$ | $B_{\text{эт}}$ | $B_{\text{ис}}$ |
| 9 | 30 | 28 | 70 | 75 | 39 | 41 | 434 | 437 |
| 10 | 32 | 28 | 66 | 71 | 21 | 21 | 416 | 419 |
| 11 | 45 | 40 | 84 | 88 | 40 | 35 | 399 | 404 |
| 12 | 59 | 52 | 89 | 93 | 85 | 75 | 375 | 382 |

Рис. 5. Освещение многоцветной композиции эталонным излучением (слева) и R излучением (справа)Рис. 6. Освещение многоцветной композиции эталонным излучением (слева) и A излучением (справа)

цветных образцов при освещении их эталонным и «приукрашивающим» излучениями. Они показали, что при освещении цветных образцов «приукрашивающим» излучением повышается интегральный коэффициент отражения. Из-за этого образцы при исследуемом излучении будут казаться более насыщенными, цветными и яркими.

Затем с помощью равноконтрастного графика системы $v_K v_3 v_C$. соответствующего отношению яркостей объекта и фона $L_o/L_\phi = 2$, были определены насыщенности всех образцов при освещении эталонным СД ИС и исследуемым излучением для каждой группы соответственно. Было также установлено, что цветовая тональность красных образцов сдвигается в более красную область спектра, жёлтых – в жёлто-оранжевую, синих – в сине-фиолетовую, зелёных – в зелёную. Эти данные соответствуют субъективным оценкам, когда наблюдатели отмечали увеличение яркости и насыщенности цвета образцов.

Были проведены расчёты насыщенности цветных образцов в двух равноконтрастных системах – $CIE LAB$

Значения насыщенности (H) и светлоты (B) для синих и зелёных образцов

| В излучение | | | | | | | | |
|-------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|--|--|-----------------|-----------------|
| № образца | $H_{\text{граф_эт}}$ | $H_{\text{граф_ис}}$ | $H_{\text{CIE LAB_эт}}$ | $H_{\text{CIE LAB_ис}}$ | $H_{\text{v}_K\text{v}_3\text{v}_C_эт}$ | $H_{\text{v}_K\text{v}_3\text{v}_C_ис}$ | $B_{\text{эт}}$ | $B_{\text{ис}}$ |
| 1 | 41 | 48 | 33 | 90 | 957 | 732 | 111 | 221 |
| 2 | 58 | 71 | 51 | 95 | 720 | 610 | 151 | 167 |
| 3 | 60 | 74 | 51 | 93 | 746 | 627 | 147 | 163 |
| 4 | 68 | 75 | 52 | 90 | 630 | 508 | 166 | 184 |
| 18 | 13 | 14 | 16 | 90 | 911 | 730 | 108 | 220 |
| G излучение | | | | | | | | |
| № образца | $H_{\text{граф_эт}}$ | $H_{\text{граф_ис}}$ | $H_{\text{CIE LAB_эт}}$ | $H_{\text{CIE LAB_ис}}$ | $H_{\text{v}_K\text{v}_3\text{v}_C_эт}$ | $H_{\text{v}_K\text{v}_3\text{v}_C_ис}$ | $B_{\text{эт}}$ | $B_{\text{ис}}$ |
| 5 | 54 | 48 | 42 | 68 | 510 | 441 | 186 | 202 |
| 6 | 52 | 53 | 43 | 69 | 634 | 559 | 149 | 161 |
| 7 | 56 | 53 | 45 | 70 | 645 | 595 | 137 | 149 |
| 8 | 36 | 39 | 40 | 68 | 448 | 405 | 200 | 208 |

и $v_K v_3 v_C$. Результаты приведены в табл. 2 и 3 для красных и жёлтых, синих и зелёных образцов соответственно.

Анализ результатов расчётов показывает, что насыщенность в системе *CIE LAB* для красных образцов увеличилась при переходе от эталонного излучения к исследуемому, что противоречит расчёту в системе $v_K v_3 v_C$. При этом светлота в $v_K v_3 v_C$ возрастает. Причём минимальна она как раз у образца № 17, а максимальна – у образца № 13, который при наблюдениях сильно выделялся. Такой разброс результатов объясним тем, что при графическом методе использовалась плоскость равной яркости при соотношении $L_o/L_\phi = 2$, а в нашем случае это отношение менялось. Система же *CIE LAB* не учитывает индуктивное влияние полей окружения [4] и не описывает однозначную связь светлоты цветных объектов с яркостью для любой цветности, что, в свою очередь, исключает возможность описания эффекта «пыления» цветов (эффект Гельмгольца–Кольрауша). Таким образом, за счёт увеличения светлоты в большей мере становятся привлекательнее красные образцы.



Рис. 7. Освещение многоцветной композиции эталонным излучением (слева) и V излучением (справа)



Рис. 8. Освещение многоцветной композиции эталонным излучением (слева) и G излучением (справа)

Диапазоны значений насыщенности (H) и светлоты (V) для создания эффекта «приукрашивания» цветных объектов

| Цвет объектов | H , пороги | V , пороги |
|---------------|--------------|--------------|
| Красный | 300–600 | 150–260 |
| Жёлтый | 35–75 | 380–440 |
| Синий | 500–630 | 160–190 |
| Зелёный | 440–600 | 145–205 |

Для наглядности представления эффекта «приукрашивания» цветных объектов была создана многоцветная композиция, которая освещалась эталонным излучением и полученными исследуемыми излучениями (рис. 5–8).

Анализируя результаты, можно заметить, что при переходе от эталонного излучения к исследуемому насыщенность (согласно системе $V_K V_3 V_C$) уменьшается, а светлота возрастает. Таким образом, при эффекте «пыления» цветов наш зрительный аппарат реагирует именно на изменение светлоты, а не насыщенности. При этом некомфортным по восприятию оказывается образец как со слишком большим уровнем светлоты, так и с малым. В табл. 4 приведены диапазоны значений насыщенности и светлоты для создания эффекта «приукрашивания» цветных объектов разной тональности.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают усиление цвета образцов при использовании разноспектральных излучений. Изменяются светлота, насыщенность и цветовая тональность цветных объектов. При этом спектры исследуемых излучений отличаются от спектра эталонного излучения и характеризуются более низкими значениями R_a . Для оценки эффекта «приукрашивания» цвета оказалось невозможным использовать систему $CIELAB$ из-за отсутствия однозначной связи светлоты и яркости цветных объектов. При использовании «приукрашивающего» излучения возрастала «привлекательность» цветных образцов в основном за счёт увеличения их светлоты. Результаты работы показывают, что не во всех случаях при освещении цветных объектов надо использовать ИС с R_a , близким к 100. Это открывает

возможность разрабатывать СД для создания эффекта «приукрашивания» при освещении разных по назначению объектов при внутреннем и наружном архитектурном освещении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев И. С., Лебедева С. М. Установка для исследования приукрашивания объектов при светодиодном освещении / XX Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиотехника, электроника и энергетика», 27–28.02.2014, НИУ «МЭИ»: Тез. докл. – Т. 1. – М.: Изд. дом МЭИ, 2014. – С. 168.
2. Журавлев Г. Е., Забродин Ю. М., Крылов В. Ю. Психология и математика. – М.: Наука, 1976. – 296 с.
3. Ван дер Варден Б. Л. Математическая статистика. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. – 434 с.
4. Мешков В. В., Матвеев А. Б. Основы светотехники: Учеб. пособие для вузов: В 2-х ч. Ч. 2. Физиологическая оптика и колориметрия. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 432 с.



Лебедева Светлана Михайловна, кандидат техн. наук, профессор. Окончила в 1971 г. кафедру светотехники МЭИ. Руководитель отдела

«Осветительные установки» кафедры «Светотехника» ФГОУ ВПО «НИУ «МЭИ»



Лузина Юлия Александровна, магистр технических наук. Окончила в 2015 г. кафедру «Светотехника» ФГОУ ВПО «НИУ «МЭИ»

Активируемые светом наночастицы эффективны в борьбе с бактериями, резистентными к антибиотикам

Исследователи из Колорадского университета в Боулдере (США) разработали новый вид лечения, действенный в борьбе с бактериями, устойчивыми к антибиотикам. В основе метода – использование наночастиц, активируемых светом, так называемых квантовых точек. Статья о разработке опубликована в журнале «*Nature Materials*», а о результатах исследования рассказывается на сайте «*Science News*».

Квантовые точки – мельчайшие частицы, в 20 тысяч раз меньше толщины человеческого волоса и похожие на крошечные полупроводники, используемые в электронных приборах. Учёные искали способ использовать их в лечебных целях, и в итоге им удалось успешно уничтожить в лабораторном эксперименте 92% клеток бактерий, резистентных к антибиотикам.

В предыдущих исследованиях было показано, что наночастицы золота и серебра могут быть эффективны в борьбе с инфекциями, но проблема в том, что заодно они уничтожают и окружающие клетки. Новая же технология лишена этого недостатка: частицы неактивны в темноте, но «включаются» на свету. Таким образом можно целенаправленно воздействовать на патогены.

Авторы статьи уверены, что метод крайне перспективен с учётом того, что появляется всё больше бактерий, резистентных к антибиотикам. (Портал scientificrussia.ru недавно рассказывал о том, что бактерии, устойчивые даже к самым сильным современным средствам, зафиксированы на территориях Китая и, немного позднее, Европы.)

<http://scientificrussia.ru>
20.01.2016/

Поправки

В № 6 журнала «Светотехника» за 2015 г. на с. 62 в подписи к рис. 11 вместо «Светильник-глубокоизлучатель. «АСТЗ» следует читать «Прожектор «QUADRUS MONO LED». «Брайтэлек», а на с. 33 в сноске вместо «<http://www.sveto-tekhnika/art/2015/1208>» – «<http://www.sveto-tekhnika.ru/art/2015/1208>». Редакция приносит свои извинения.