

И. А. ГАРЮТИН

## ФОРМИРОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ПОДОБИЯ ЦВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОРАЗРЯДНЫХ МЕТАЛЛОГАЛОГЕННЫХ ЛАМП

Представлен обзор существующих цветовых систем координат и рассмотрена возможность их использования для формирования критерия подобия (близости) цветовых характеристик металлогалогенных газоразрядных ламп.

*Ключевые слова:* газоразрядные лампы, цветовые координаты, критерий близости.

В осветительных приборах часто используются газоразрядные лампы, излучающие свет, получаемый в результате электрического разряда в газах, парах металлов или в их смесях. Предпочтительность этих ламп по сравнению с лампами накаливания обусловлена относительно длительным сроком службы, составляющим в среднем до 12 тыс. ч., и высокой световой отдачей, достигающей 85—150 лм/Вт. Такие лампы выпускаются в широком диапазоне мощностей, а за счет подбора соответствующего газового наполнения и режимов разряда источники излучения создаются практически для любой части спектра — от инфракрасной до ультрафиолетовой — и с любой цветовой температурой. При этом спектр газоразрядных ламп может быть непрерывным или линейчатым, состоящим из большого числа линий или из одиночных линий [1, 2].

Все газоразрядные источники света можно разделить на две группы: лампы высокого и низкого давления. Среди газонаполненных ламп высокого давления можно выделить металлогалогенные лампы высокого давления. В них качестве излучающего тела используется смесь паров инертных газов и галогенидов некоторых металлов для создания непрерывного галогенного цикла [1]. Такие лампы обладают линейчатым спектром излучения в диапазоне 1—1500...2000 мкм. В видимой области (760—380 мкм) их световой спектр излучения можно подобрать близким к солнечному [2]. По этой причине благодаря высокому КПД и сроку службы эти лампы применяются на автомобилях в головной оптической системе (фарах) дальнего и ближнего света, при оформлении интерьеров зданий и витрин, при фото- и видеосъемке, а также везде, где требуются источники света с хорошей цветопередачей и высокой мощностью излучения.

Один из недостатков металлогалогенных ламп — различие их спектральных характеристик, связанное с разбросом интенсивности светового излучения в различных областях спектра. По этой причине две лампы, устанавливаемые в единую систему освещения, могут излучать свет с различными доминирующими длинами волн, т.е. с различными цветовыми тонами. Такой комплект, как правило, не устраивает потребителя из-за возникающего зрительного

дискомфорта. В то же время изготовителям ламп зачастую сложно предъявить претензии по указанному недостатку, так как они не всегда имеют возможность реализовать технологический процесс изготовления металлогалогенных ламп с достаточно близкими спектрами излучения. Поэтому приобрела актуальность задача численной оценки цвета излучения газоразрядной лампы, или точнее, введения критерия, по которому можно определить степень схожести цветовых характеристик двух источников света.

Любой оттенок в колориметрии можно описать, используя три линейно независимых цвета, т.е. такие, которые нельзя получить смешением двух других основных цветов. Системы таких цветов называются цветовыми системами координат (ЦСК). Одна из первых ЦСК, довольно широко используемая и в настоящее время, это система RGB, в которой, задавая уровень (или процентное соотношение) каждого из цветов, можно получить практически любой цвет, видимый глазом. Именно эта система была рекомендована Международной комиссией по освещению (МКО) в 1931 г.

Однако система RGB имеет ряд недостатков. Во-первых, из-за особенностей выбора основных цветов (красного, зеленого и синего) не все видимые цвета можно получить сложением этих трех координат. Во-вторых, для получения некоторых оттенков приходится использовать отрицательные значения  $R$ -координаты, что неудобно при расчетах и практической реализации. В следующей версии МКО была принята ЦСК XYZ, в которой в качестве базовых цветов выбраны реально невозпроизводимые условные цвета: X, Y и Z. При этом цветовая система RGB полностью „укладывается“ в новую систему координат.

Значения координат в системе XYZ можно вычислить по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} X &= \int_{380}^{760} E(\lambda)\rho(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda; \\ Y &= \int_{380}^{760} E(\lambda)\rho(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda; \\ Z &= \int_{380}^{760} E(\lambda)\rho(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda, \end{aligned} \right\}$$

где  $E(\lambda)$  — спектральное распределение световой энергии;  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  — удельные координаты сложения;  $\rho(\lambda)$  — спектральный коэффициент отражения (для источника света его значение принимается равным единице).

Интегрирование проводится в диапазоне длин волн видимого излучения 380—760 нм. Кроме того, для исключения влияния яркости на результаты расчетов вводится нормированная функция

$$h = \frac{100}{\int E(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda}.$$

На практике интегрирование удобнее заменять суммированием, что связано со сложностью математического описания спектральных функций. Интервал суммирования обычно выбирается равным от 5 до 10 нм:

$$\left. \begin{aligned} X &= \Delta\lambda h \sum_{\lambda} E(\lambda)\bar{x}(\lambda); \\ Y &= \Delta\lambda h \sum_{\lambda} E(\lambda)\bar{y}(\lambda); \\ Z &= \Delta\lambda h \sum_{\lambda} E(\lambda)\bar{z}(\lambda). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Природа человеческого цветовосприятия зависит от множества факторов, и практически невозможно составить адекватную ей математическую модель. Кроме того, на восприятие человеком цвета влияет целый ряд дополнительных факторов, например: общее состояние организма, дальтонизм, усталость, аккомодация глаза и т.д. Это приводит к тому, что разные значения цветовых координат воспринимаются человеком по-разному и с разной чувствительностью. По этой причине цветоразличение в разных цветовых областях ЦСК происходит неравномерно. Для того чтобы избежать этого недостатка МКО были предложены несколько равноконтрастных систем координат, т.е. систем, в которых коэффициент цветоразличения для разных значений координат практически одинаков.

Одна из таких равноконтрастных ЦСК — система Lab, являющаяся производной от системы XYZ. В основу системы Lab положена оригинальная, отличная от классической, система цветовосприятия, согласно которой ощущения человека формируются в соответствии с восприятием трех противоположных пар цветов: 1-я пара — белый и черный (L, яркость); 2-я пара — красный и желтый (a); 3-я пара — желтый и синий (b).

Связь координат цветовой системы Lab с координатами системы XYZ выражается следующими эмпирическими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} L &= 116 \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16; \\ a &= 500 \left[ \left( \frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right]; \\ b &= 200 \left[ \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left( \frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right] \end{aligned} \right\}$$

где  $X_n, Y_n, Z_n$  — координаты одного из стандартных источников света.

Цветовой контраст между двумя газоразрядными металлогалогенными источниками света в системе Lab определяется по формуле

$$\Delta K = \left[ (\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где  $\Delta L$  — разность яркостных характеристик сравниваемых источников света,  $\Delta a$  и  $\Delta b$  — соответственно разность их цветовых координат.

Рассмотрим особенности спектральной характеристики  $E(\lambda)$  металлогалогенной лампы. Наиболее важной составляющей характеристики, полученной с помощью спектрографа, является видимая часть спектра. Для выделения этой части спектра с помощью специальных оптических фильтров удаляются инфракрасная и ультрафиолетовая составляющие характеристики. Форма полученной спектральной характеристики довольно сложна и найти для нее аппроксимирующую функцию трудно. Доминирующей (имеющей максимальную амплитуду) в спектре является волна  $\lambda = 550 \dots 605$  нм, которая выбрана в качестве нормирующей, и ее величина на спектральной характеристике принята за 100 %. Интенсивность излучаемых волн в спектре различна: она имеет локальные экстремумы и снижается с уменьшением их длины.

На спектрографе были получены 1000 результатов измерений спектральных характеристик для металлогалогенных ламп (отсчетов для функции  $E(\lambda)$ ): см. рис. 1, а. Такое большое количество результатов не всегда целесообразно для обработки. За счет применения операции децимации (равномерного прореживания) количество результатов измерений было

сокращено до 80 значений, оценка вносимой погрешности по изменению значений СКО была произведена в работе [3]. График спектральной характеристики после проведения децимации приведен на рис. 1, б.

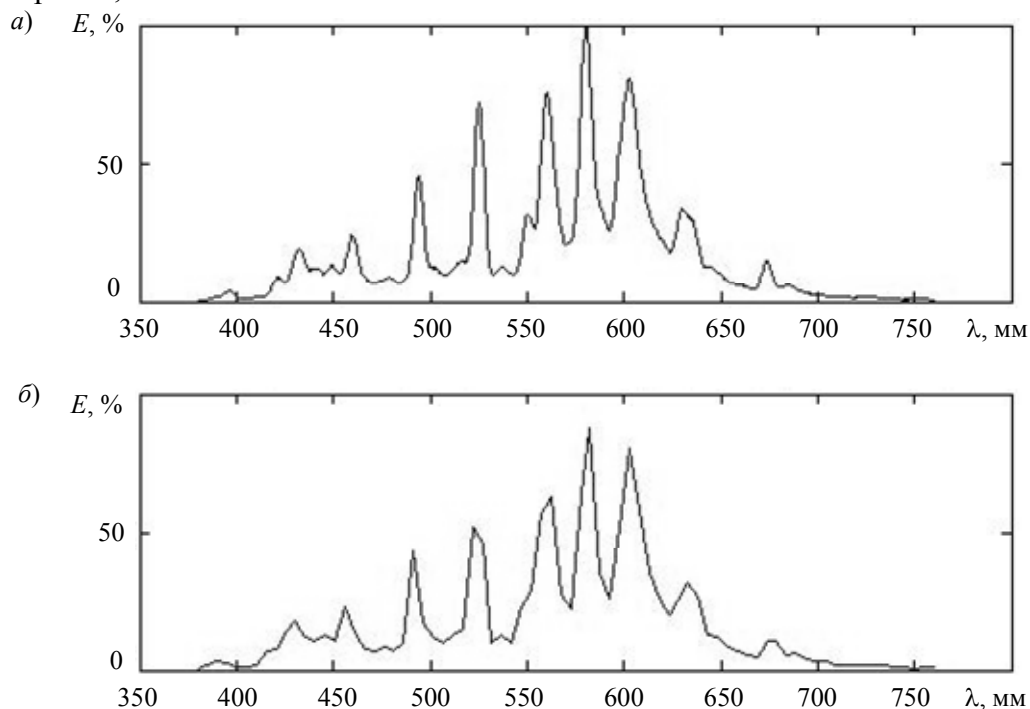


Рис. 1

Задача определения заметной для человеческого глаза разницы между двумя схожими цветовыми оттенками осложняется особенностями зрения. Как отмечалось выше, восприятие цвета человеком сильно зависит от целого ряда факторов, которые практически невозможно учесть при математическом описании. Поэтому на сегодняшний день не существует достоверных математических методов для описания или оценки чувствительности человеческого зрения. Единственным способом установить разницу в цветовосприятии является экспертная оценка.

Для этого в присутствии экспертов при разных внешних условиях производилось включение нескольких пар ламп с разным разбросом спектральных характеристик. Таким образом были определены две лампы, разница цветового излучения которых хотя и заметна, но не вызывает чувства дискомфорта у потребителя.

Для расчета численных значений цветового контраста спектральных характеристик были взяты три пары металлогалогенных газоразрядных ламп: одна пара ламп, для которых различия в цвете заметны для потребителя; вторая пара ламп, где визуально различие практически незаметно, и третья пара с недопустимо большим различием спектральных характеристик (рис. 2).

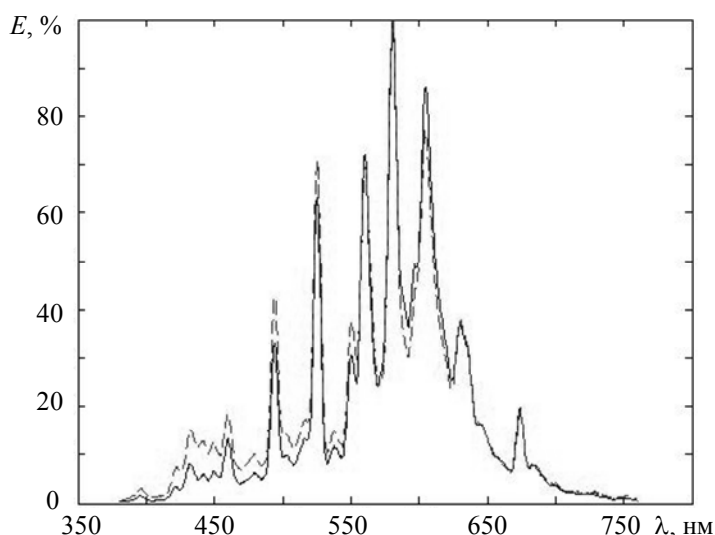


Рис. 2

Расчеты координат в цветовой системе XYZ были проведены по формулам (1), затем эти координаты были переведены в равноконтрастную

цветовую систему Lab для устранения нелинейности цветовосприятия и по формуле (2) рассчитаны значения цветового контраста.

Рассмотрим результаты расчета цветовых контрастов для трех пар ламп:

— для 1-й пары ламп с незначительной разницей спектральных характеристик

$$\Delta K_1 = 0,0713;$$

— для 2-й пары ламп с визуальной заметной разницей спектральных характеристик

$$\Delta K_2 = 0,5529;$$

— для 3-й пары ламп с недопустимо большой разницей спектральных характеристик

$$\Delta K_3 = 2,1455.$$

По результатам расчета можно сделать следующий вывод: для комплектования систем освещения на базе газоразрядных металлогалогенных ламп необходимо, чтобы значения цветового контраста составляли не больше  $\Delta K = 0,6$ . При этом значении  $\Delta K$  человеческий глаз уже не замечает разницы в цвете источника освещения и соответственно потребитель не испытывает дискомфорта при работе с такими системами освещения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю. Б. Айзенберга. М.: Энергоатомиздат, 1983. 621 с.
2. Гуторов М. М. Основы светотехники и источники света: Учеб. пособие. М.: Энергия, 1968. 456 с.
3. Худяков В. Ф., Хабuzов В. А., Гарютин И. А. Подбор ксеноновых ламп высокого давления при комплектовании фар автомобиля с использованием вейвлет-преобразования // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2004. № 1. С. 62—67.

#### *Сведения об авторе*

**Игорь Александрович Гарютин**

— Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра микро- и нанотехнологий аэрокосмического приборостроения; ст. преподаватель;  
E-mail: manoftomorrow@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
микро- и нанотехнологий  
аэрокосмического приборостроения

Поступила в редакцию  
02.03.11 г.