

Пранцишкус Витта (Pranciškus Vitta)

Наружное освещение: баланс между привлекательностью и пользой

➔ Статья посвящена практическому подтверждению гипотезы Круитхофа о том, что в наружной среде интервалы комфортных цветовых температур освещения не столь однозначно определяются, они существенно шире и смещены в сторону больших значений.



Для проверки гипотезы Круитхофа¹ (А. А. Kruithof) учеными и студентами из группы светотехнических исследований Вильнюсского университета (Литва) при технической поддержке Ledigma Ltd. (Вильнюс, Литва) и финансовой поддержке Научного совета Литвы (грант № АТЕ01/2012) в нескольких вариантах наружной обстановки был применен интеллектуальный полупроводниковый RGBA-светогенератор с регулируемой коррелированной цветовой температурой (ССТ) и высокоточной цветопередачей. От участников эксперимента, которым было позволено регулировать цветовую температуру, требовалось подобрать наиболее комфортные для них условия освещения. При поддержании постоянной освещенности наблюдался рост средней выбранной цветовой температуры с (3000 ± 200) К при освещенности 5 лк и примерно до (3500 ± 250) К при освещенности 50 лк, практически независимо от обстановки.

Коррелированная цветовая температура (КЦТ) источника света определяется как температура абсолютно черного тела, излучающего свет того же оттенка, что и рассматриваемый источник. Свет с КЦТ в диапазоне 2500–10 000 К обычно считается «белым», с теплыми желтоватыми и прохладными голубоватыми оттенками соответственно у нижнего и верхнего пределов этого диапазона. До наступления эры полупроводниковой светотехники выбор цветовой температур сводился к конечному множеству значений — в основном по причине технических ограничений, свойственных лампам накаливания, люминесцентным и газоразрядным лампам. Экспериментальных данных для проверки гипотезы Круитхофа было недостаточно, но основная ее суть заключалась в существовании областей, комфортных с точки зрения наблюдателя уровней освещенности и цветовых температур (рис. 1). По данным Круитхофа, комфортные условия освещения наблюдаются в узкой области между красной и синей кривыми, а области выше и ниже воспринимаются, соответственно, как имеющие неприятный желтоватый и голубоватый оттенок.

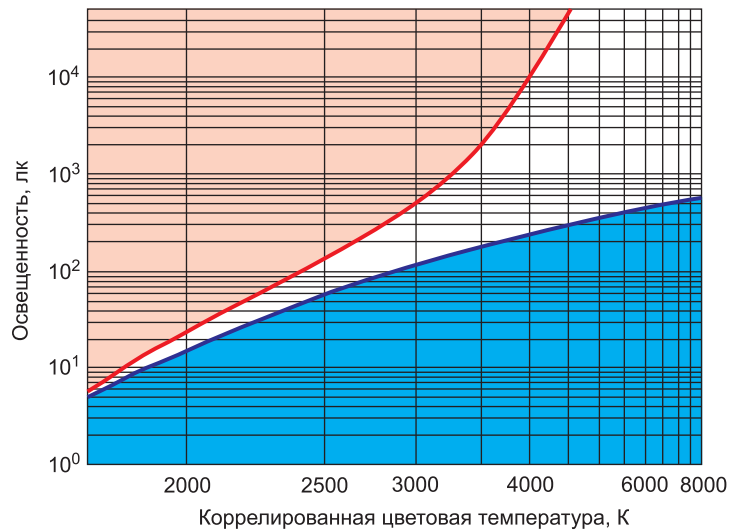
Чтобы подтвердить или опровергнуть гипотезу Круитхофа, было проведено

¹ В 1941 г. А. А. Круитхоф (А. А. Kruithof), исследователь Philips Labs, выдвинул гипотезу о том, что люди предпочитают свет с разными цветовыми температурами в определенных условиях освещенности [1].

множество исследований. В большинстве из них рассматривалось освещение офисных или жилых помещений с уровнями освещенности в диапазоне 100–1000 лк. Некоторые исследователи по результатам экспериментов с большим числом участников заявляли о качественном подтверждении гипотезы, обнаружив тенденцию к повышению выбираемых значений КЦТ с ростом освещенности. Более того, субъективное ранжирование люминесцентных ламп показало, что для офисного освещения наиболее комфортна КЦТ около 4000 К, а это согласуется с предположением Круитхофа. Другие независимые исследовательские группы выявили склонность испытуемых к предпочтению более высокой освещенности, независимо от КЦТ [2]. Из этих результатов следует, что при постоянной освещенности может существовать некоторый диапазон комфортных КЦТ, но при постоянной КЦТ освещение будет тем комфортнее, чем выше освещенность. Кроме того, в диапазоне уровней освещенности офисного освещения 300–600 лк не было выявлено влияния КЦТ на эффективность выполнения задач и когнитивную деятельность, но наблюдалось ее влияние на настроение.

Для наружного освещения практически не существует научных подтверждений гипотезы Круитхофа ввиду чрезвычайной узости интервалов комфортных КЦТ, которые эта гипотеза предполагает для низких уровней освещенности. Для уровней освещенности, рекомендуемых европейским стандартом на дорожное освещение (2–50 лк), наиболее комфортные КЦТ, согласно Круитхофу, находятся ниже 2500 К. Так сложилось, что наиболее популярными источниками света для уличного освещения стали натриевые лампы высокого давления (НЛВД), появившиеся через несколько десятилетий после исследования Круитхофа. Успех НЛВД обусловлен их высокой световой отдачей (80–140 лм/Вт), относительно небольшими размерами, длительным сроком службы и лучшей цветопередачей, чем у более старых натриевых ламп низкого давления. Позже, когда на рынке наружного освещения стали появляться новые технологии, НЛВД рассматривались как эталон, с которым сравнивались новые источники света. Несмотря на успех НЛВД, ученые не оставили попыток подобрать наиболее

Рис. 1. Согласно гипотезе Круитхофа, область между двумя кривыми задает интервал условий комфортного освещения



подходящую цветовую температуру для условий освещения, которые обычно имеют место вне помещений. В ходе таких исследований было опять-таки показано, что субъективно ощущаемые комфорт и безопасность на автостоянке повышаются с ростом освещенности вне зависимости от цветовой температуры при использовании как НЛВД с КЦТ 2000 К, так и металлогалогенных ламп (МГЛ) с КЦТ 4250 К [3]. Результаты некоторых других исследований показали, что испытуемые предпочитают светодиодные и металлогалогенные лампы теплого и холодного белого цветов (около 3000–4000 К) натриевым лампам высокого давления (1900 К), однако при этом не было отдельно учтено влияние цветопередачи и КЦТ на принятые участниками решения.

Помимо описанного выше чувства визуального «удовлетворения», коротковолновый свет оказывает незрительное (фотобиологическое) воздействие на людей и другие живые существа, особенно в ночное время. Поэтому сейчас идет активная дискуссия о переходе с источников света, бедных синими спектральными составляющими, на источники с повышенным содержанием этих составляющих в спектре [4]. В частности, после открытия фоточувствительных ганглиозных клеток сетчатки, которые содержат поглощающий синий свет фотопигмент меланопсин, применение обогащенного синими спектральными

составляющими света (МГЛ и обычных светодиодных ламп) в ночное время стало считаться вредным из-за того, что такой свет подавляет выделение мелатонина в эпифизе и сдвигает суточный ритм этого процесса даже при низких уровнях освещенности [5]. Мелатонин считается одним из главных онкостатических гормонов в человеческом организме и отвечает за циркадные ритмы. Поэтому при выборе комфортной КЦТ наружного освещения важно учитывать способность света подавлять выработку мелатонина.

Далее будет продемонстрирована зависимость субъективно выбираемой комфортной КЦТ от освещенности для различных видов наружной обстановки. Кроме того, показано, что при диммировании освещения испытуемые готовы пожертвовать приятностью цветовой температуры в пользу неизменного «циркадного действия».

Эксперимент

Учитывая как субъективный визуальный комфорт, так и фотобиологическое воздействие, группа светотехнических исследователей Вильнюсского университета провела эксперимент с применением регулируемого многоцветного светодиодного светогенератора. Для плавной регулировки цветовой температуры освещения использовались специально сконструированные наружные светильники, состоящие из четырех мощных



Рис. 2. Условия эксперимента во Дворе бурсы Вильнюсского университета

цветных светодиодов (красный, янтарный, зеленый и голубой), и четырехканальные источники питания с беспроводным управлением [5]. Фотография обстановки в месте проведения эксперимента приведена на рис. 2. Светильники были смонтированы на стремянках высотой

4,2 м (можно также видеть экспериментальное оборудование). Алгоритм управления, выполнявшийся на удаленном компьютере, обеспечивал непрерывное поддержание режима высокой точности цветопередачи ($R_a > 91$) во всем диапазоне регулировки КЦТ с помощью подпро-

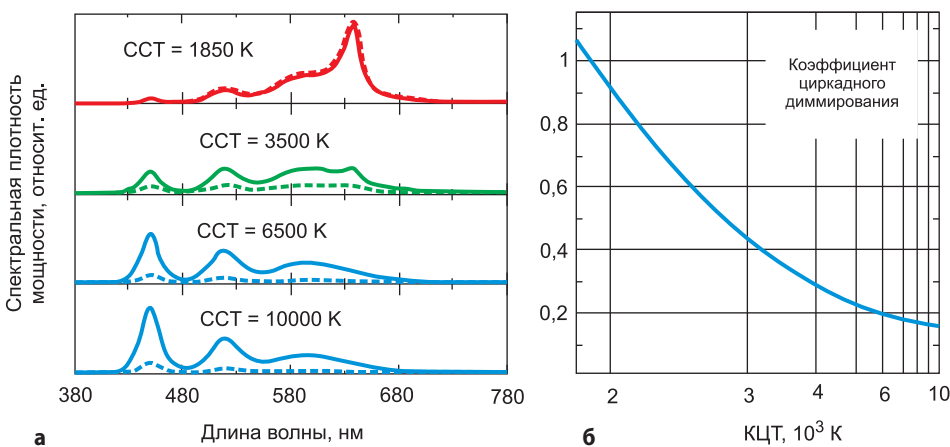


Рис. 3. а) Спектральная плотность мощности излучения регулируемого источника света для различных КЦТ в режиме постоянной освещенности (сплошные линии) и постоянного циркадного действия (пунктирные линии); б) зависимость коэффициента циркадного диммирования от КЦТ

граммы оптимизации цветосмещения для четырех первичных источников света. Испытуемые могли синхронно управлять двумя светильниками через графический интерфейс смартфона с виртуальным ползунком, устанавливая желаемую КЦТ в диапазоне линейного изменения 1850–10 000 К с шагом 10 К. Примеры спектра светового излучения для различных КЦТ приведены на рис. 3а. Кроме того, в программном обеспечении была предусмотрена возможность выполнения эксперимента по изменению условий освещения в двух режимах. В первом режиме при изменении КЦТ светильниками поддерживалась постоянная фотопическая освещенность 5 и 50 лк, что соответствует классам дорог S4 и СЕО по стандарту EN 13201; этот режим служил для проверки исходной гипотезы Круитхофа. Во втором режиме программное обеспечение ограничивало циркадное действие освещения, диммируя светильники, когда выбирались более высокие КЦТ, соответствующие повышенному содержанию синих спектральных составляющих. Уровни освещенности 5 и 50 лк, создаваемые НЛВД с цветовой температурой 1900 К, брались в качестве опорных значений показателя циркадного действия, измеренного в произвольных единицах (соответственно «5 произв. ед.» и «50 произв. ед.»). Показатель циркадного действия рассчитывался как интеграл спектральной плотности мощности светового излучения с весовой функцией циркадной эффективности [6]. Пунктирными линиями на рис. 3а показаны спектры излучения светогенераторов в режиме постоянной облученности, а зависимость коэффициента диммирования от КЦТ приведена на рис. 3б. После адаптации к определенному уровню освещенности каждого из испытуемых просили выбрать наиболее комфортную цветовую температуру при четырех вариантах задания параметров — двух постоянных уровнях освещенности и двух постоянных значениях показателя циркадного действия.

Эксперименты проводились в Вильнюсе в трех помещениях с разной обстановкой. Местом основного эксперимента был Двор бурсы на исторической территории Вильнюсского университета. Там в поле зрения наблюдателя доминировали серый тротуар, желтовато-красноватые стены и единственное зеленое дерево.

Дополнительные эксперименты проводились в парковой зоне (Ботанический сад Вильнюсского университета) и в современной городской зоне (вблизи от Национальной художественной галереи). В первом случае доминировали, соответственно, зеленые и коричневые оттенки, а во втором — оттенки серого. Целью дополнительных экспериментов было проверить, может ли окружающая обстановка влиять на выбор наиболее комфортной цветовой температуры освещения. В основном эксперименте приняли участие 40 человек, а в дополнительных — 22 и 27 человек соответственно. Испытуемые были главным образом из числа студентов и персонала Вильнюсского университета в возрасте от 19 до 57 лет (средний возраст 24 года); среди них 43% составляли женщины, а 57% — мужчины.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Сводные результаты исследования приведены на рис. 4. Цветными столбиками показаны полученные средние значения наиболее комфортной КЦТ для каждого из четырех вариантов задания параметров и трех видов наружной обстановки. Доверительные интервалы обозначены планками погрешностей. Большая ширина доверительных интервалов свидетельствует о значительном разбросе индивидуальных предпочтений. Несмотря на такой разброс, можно наблюдать характерный сдвиг цветовой температуры с 3000 К до (приблизительно) 3500 К при повышении постоянного уровня освещенности с 5 до 50 лк. Эти значения соответствуют спектру «теплого белого» света и значительно превышают те, которые были предсказаны Круитхофом (серые горизонтальные линии на рис. 4). Интересно, что в ранних экспериментах с фиксированным количеством источников света [3] этот диапазон КЦТ зафиксировать не удалось, и предпочтений между НЛВД и металлогалогенными лампами с «прохладным белым» светом выявлено не было. Качественно сходную тенденцию (рост КЦТ с 2500 до 3200 К) можно наблюдать при повышении постоянного значения показателя циркадного действия с 5 до 50 произвольных единиц. С другой стороны, изменение выбранного значения КЦТ при переходе из режима постоянной освещенности

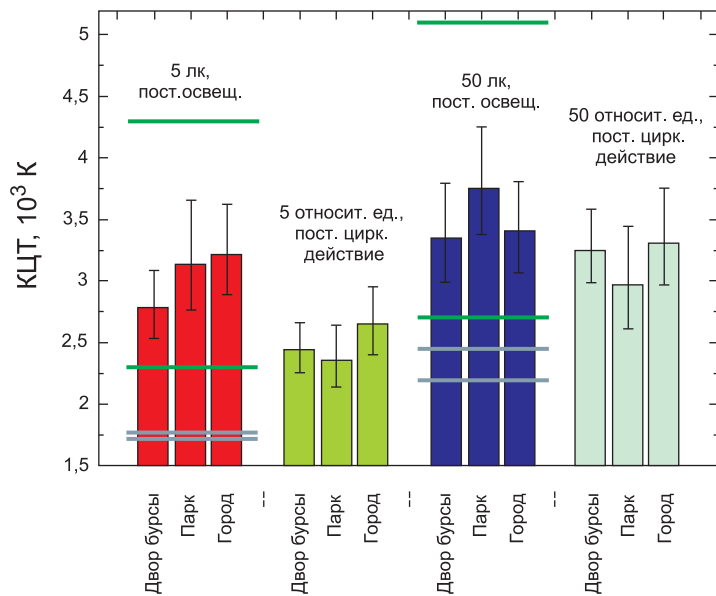


Рис. 4. Цветными столбиками показаны средние значения наиболее комфортных КЦТ для трех видов обстановки и четырех вариантов задания параметров (интервалы комфортных условий, предложенные Круитхофом и определенные в ходе настоящего исследования, находятся между серыми и зелеными линиями соответственно)

в режим постоянного циркадного действия зависит от уровня освещенности. При низком значении показателя циркадного действия (5 произв. ед.) испытуемые предпочитали большую освещенность, но значительно более низкую КЦТ света (около 2500 К), чем в режиме постоянной освещенности (около 3000 К). В данном случае коэффициент диммирования принял умеренное значение — 0,6. При более высоком значении показателя циркадного действия (50 произв. ед.) среднее значение выбранной цветовой температуры составило около 3200 К, что незначительно отличается от значения, полученного в режиме постоянной освещенности (3500 К). Но в данном случае эти значения выбирались при гораздо более низкой освещенности (коэффициент диммирования 0,4).

Полученные результаты качественно подтверждают существование эффекта Круитхофа для наружного освещения в том плане, что с повышением освещенности в качестве комфортных воспринимаются более высокие КЦТ. При этом интервалы комфортных КЦТ, которые могут быть обозначены среднеквадратичным отклонением результатов, представляются гораздо более широкими, чем те, которые предсказаны Круитхофом для низких значений освещенности (рис. 1 и 3). В частности,

мы можем утверждать, что интервалы комфортных КЦТ действительно существуют для определенных условий освещения и, в среднем, наиболее приемлемы в смысле комфортности для испытуемых, не занятых выполнением определенной задачи. Дополнительные эксперименты с диммированием, предотвращающим усиление циркадного действия, показали, что при низких уровнях освещенности для испытуемых важнее сама освещенность, чем предпочтительная КЦТ. В то же время при более высоких уровнях освещенности испытуемые, как правило, жертвовали освещенностью (до некоторой степени) в пользу предпочтительной КЦТ. Стоит отметить, что результаты приведенного исследования ограничены одним значением географической широты (55° с. ш.) и единым культурным багажом испытуемых.

Выводы

По итогам исследования были определены интервалы КЦТ, соответствующие субъективно «приятным» условиям освещения для типичных уровней наружной освещенности. Путем корректировки КЦТ при постоянной освещенности с помощью непрерывно регулируемого полупроводникового светогенератора с высокоточной цветопередачей получено качественное

подтверждение гипотезы Круитхофа, заключающееся в том, что с повышением освещенности в качестве комфортных воспринимаются более высокие КЦТ. Вместе с тем полученные средние значения предпочтительной КЦТ были гораздо выше предсказанных Круитхофом, а их интервалы — значительно шире. Не выявлено существенной зависимости полученных значений от характера наблюдаемых объектов и их цветовой гаммы (по крайней мере, для группы испытуемых с конкретным культурным багажом и для конкретной географической широты).

Кроме того, эксперименты с поддержанием постоянного уровня циркадного действия показали, что при более низких уровнях освещенности испытуемые, как правило, выбирают пониженную (относительно

комфортной) КЦТ, предпочитая более высокую освещенность. При более высоких уровнях освещенности испытуемые прибегали к более заметному диммированию, чтобы сохранить комфортную КЦТ. ●

Оригинал статьи опубликован на www.led-professional.com

Литература

1. Kruithof A. A. Tabular luminescence lamps for general illumination. Philips Techn Rev. 1941.
2. Wake T., Kikuchi T., Takeichi K., Kasama M., Kamisasa H. The effects of illuminance, color temperature and color rendering index of light sources upon comfortable visual environments in the case of office // J Lighting Vis Env. 1977.
3. Boyce P.R., Bruno L.D. An evaluation of high pressure sodium and metal halide light sources for parking lot lighting // J Illum Eng Soc. 1999.
4. Int. Dark-Sky Assoc. Visibility, environmental, and astronomical issues associated with blue-rich white outdoor lighting. IDA. Washington. DC. USA. 2010.
5. Lockley S. W., Brainard G. C., Czeisler C. A. High sensitivity of the human circadian melatonin rhythm to resetting by short wavelength light. // J. Clin. Endocr. Metab. Vol. 88. 2003. № 9.
6. Zukauskas A., Vaicekauskas R., Vitta P., Tuzikas A., Petrulis A., Shur M. Color rendition engine. Opt Express. 2012.
7. Gall D. Circadiane Lichtgroßen und deren messtechnische Ermittlung // Licht. 2002. № 54.