

Екатерина Ильина | iei@rtcs.ru

Наружное светодиодное освещение автомагистралей и улиц городов

Применимость светодиодов в наружном освещении с точки зрения визуального восприятия

Данная статья продолжает цикл публикаций, посвященных наружному светодиодному освещению улиц. В настоящее время ведется много споров относительно применимости светодиодов как источников света в различных областях. Рассмотрим критерии выбора светодиодов с точки зрения восприятия света и определим варианты, наилучшим образом подходящие для последующей разработки модуля в светильник наружного освещения.

О зрительном процессе

Зрение человека — это сложный процесс, связанный с восприятием света сетчаткой глаза. Попадая на сетчатку, свет воздействует на фоточувствительные клетки: три вида колбочек и палочки. Далее возбуждение, вызванное его воздействием, передается по зрительному нерву в головной мозг. Процесс возбуждения фоторецепторов не линеен и зависит от многих

параметров, прежде всего — от физических особенностей сетчатки глаза. Рассмотрим ее строение.

Всего в сетчатке содержится примерно 130 млн палочек и более 7 млн колбочек [2], которые различаются как по своей форме, так и по свойствам. Палочки представляют собой длинные и тонкие клетки, сориентированные по оси прохождения света и расположенные в пределах всей сетчатки с зоной максимальной их кон-

центрации на расстоянии 10–12° от центра (на периферии). Колбочки — короткие конусообразные клетки, сосредоточенные в центральной зоне сетчатки с максимальной концентрацией в центральной ямке глаза. Внешний вид фоторецепторов показан на рис. 1а, их расположение на сетчатке — на рис. 1б [3].

Глаз способен различать мельчайшие детали изображения лишь центральной частью поля зрения с угловым размером в 1,3–1,5°. Поэтому центральное зрение еще называют колбочковым. За периферическое зрение в большей степени отвечают палочки, так как они распределены в периферической зоне.

Зрение также делится на: дневное (колбочковое), ночное (палочковое) и сумеречное (совместная работа колбочек и палочек). В та-

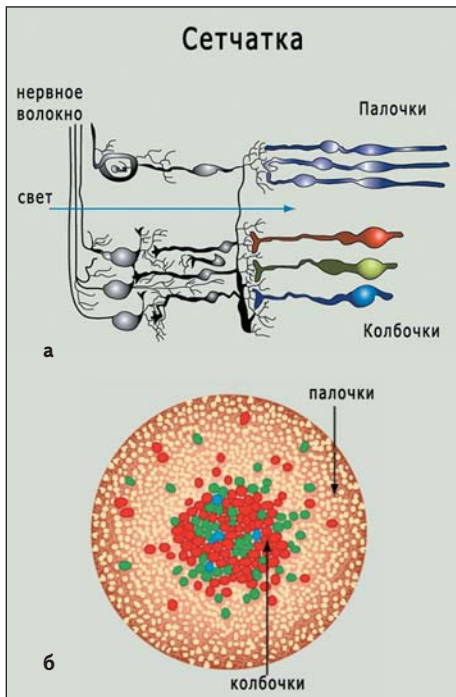


Рис. 1. Внешний вид фоторецепторов и расположение их на сетчатке: а) палочки подсоединены к нервному волокну группами, колбочки практически индивидуально; б) колбочки сосредоточены в центре сетчатки, палочки — по периферии

Таблица 1. Характеристики зрения

| Характеристика | Ночное зрение | Сумеречное зрение | Дневное зрение |
|--|--|--|--|
| Вид активных фоторецепторов | Палочки | Палочки и колбочки | Колбочки |
| Поле зрения | Периферическое | Периферическое и центральное | Центральное |
| Функция зрения | Ориентация в пространстве, восприятие диффузного света (отсутствует восприятие цвета и мелких деталей) | С понижением уровня освещенности ухудшается острота зрения, восприятие цвета и формы | Высокая острота зрения, восприятие цвета и формы |
| Общее количество задействованных фоторецепторов в сетчатке, шт. | 130 000 000 | Зависит от уровня освещенности объектов | 7 000 000 |
| Виды рецепторов, шт. | 1 | 4 | 3 |
| Уровни яркости наибольшей светочувствительности, кд/м ² | 0,1 < L | 0,1 < L < 10 | L > 10 |
| Обозначение спектральной чувствительности | $V_m(\lambda)$ | $V_{mes}(\lambda)$ | $V(\lambda)$ |
| Диапазон спектральной чувствительности, нм | 380–640 | Диапазон сдвигается в синюю область с понижением уровня освещенности | 410–720 |
| Максимум спектральной чувствительности λ_{max} , нм | 512 | 512 | 555 |
| Значение максимальной чувствительности, лм/Вт | 1700 | 683–1700 | 683 |
| Примеры освещения | Свет луны | Наружное освещение | Общее освещение |

Таблица 2. Уровни яркости для наружного и архитектурного освещения

| Категория объекта по освещению | Характеристика категории | Средняя яркость покрытия при наружном освещении, кд/м ² | Средняя яркость городского объекта при архитектурном освещении, кд/м ² | | |
|--------------------------------|---|--|---|----------------------|-----------|
| | | | местоположение освещаемого объекта | заливающее/локальное | акцентное |
| А | Магистральные дороги, магистральные улицы общегородского значения | 0,8–1,6 | площади | 10/10 | 30 |
| | | | магистральные улицы | 8/8 | 25 |
| | | | парки, сады | 5/5 | 15 |
| Б | Магистральные улицы районного значения | 0,6–1,0 | площади | 7/8 | 20 |
| | | | магистральные улицы | 5/5 | 15 |
| | | | парки, сады | 3/3 | 10* |
| В | Улицы и дороги местного значения | 0,2–0,4 | площади, улицы | 3/3 | 10* |
| | | | парки, сады | 3/3 | 8* |

блице 1 приведены характеристики чувствительности глаза для всех видов зрения.

Палочковое (ночное) зрение обладает наибольшей чувствительностью к свету при низких уровнях яркости (ниже 0,1 кд/м²), но не способно передавать ощущение цветности. Колбочковое (дневное) обеспечивает цветное зрение, но оно значительно менее чувствительно к слабому свету и полностью функционирует только при уровнях яркости выше 10 кд/м². Это объясняется тем, что палочки подсоединяются к нервным волокнам группами по несколько десятков и сотен, а колбочки — практически индивидуально (как правило, не более двух-трех элементов на одно волокно). Группа палочек реагирует на свет медленнее, чем одна-две-три колбочки. Основное достоинство группового соединения — большая чувствительность к слабому свету. Дневное зрение характеризуется высокой остротой зрения, хорошим визуальным восприятием цвета и формы предмета, тогда как ночное зрение отвечает за ориентацию в пространстве.

Скорость адаптации фоторецепторов ночного зрения к изменению яркости гораздо ниже, чем у фоторецепторов дневного. Поэтому к темноте глаз привыкает медленно. И стоит перейти из темного помещения в светлое, как сразу же активизируется дневное зрение.

Важно отметить, что спектральная чувствительность (СЧ) фоторецепторов различна для различных длин волн видимого спектра (380–760 нм) и разных уровней интенсивности света (рис. 2). Так, например, ночное зрение наиболее чувствительно в изумрудно-зеленой части спектра, поэтому в сумерках изумрудный цвет кажется ярче, чем все остальные.

Нормативная база и сумеречное освещение

Как было рассмотрено в [1], в нашей стране нормируются яркость и освещенность дорожного полотна. В [4] уровни яркости дорожного полотна определяются в пределах 0,2–1,6 кд/м² в зависимости от категории улицы (табл. 2).

Уровни яркости для наружного освещения принимаются исходя из отражающих свойств поверхности асфальта в сухую погоду, т. е. при нормальных условиях вождения (НУВ).

Согласно проведенным в 2007 г. Экриасом (Ekrías) и Кастилло (Castillo) измерениям уровней яркости дорожного полотна [5], создаваемое различными осветительными установками распределение яркости существенно меняется в зависимости от различных погодных условий. Например, в дождливую погоду яркость участка поверхности дороги с зеркальным отражением в направлении линии зрения водителя увеличивается по сравнению с яркостью при НУВ, тогда как яркость участков в темной области дорожного полотна уменьшается. Возрастающая неравномерность яркости полотна приводит к ухудшению условий видимости. При этом уровень средней яркости мокрого полотна возрастает. В снежную погоду яркость дорожного полотна может быть в несколько раз больше, чем при НУВ. Оказалось, что для всех погодных условий диапазон яркости окружения обычно не превышает уровень в 5 кд/м² и лежит в области сумеречного зрения.

Во время движения водитель, как правило, смотрит прямо вперед, и если на дороге возникает препятствие по линии движения, то оно попадает в центральное поле зрения водителя, в зону работы дневного зрения. Но препятствия могут возникать и на периферии, в зоне совместной работы ночного и дневного зрения. Способность к обнаружению движущихся объектов (автомобилей, пешеходов, велосипедистов) как в центральной, так и в периферической зоне — важная часть зрительной работы водителя. Ее значение возрастает особенно в ночное время суток. Было установлено [9, 11], что в условиях сумеречного зрения обнаружение движущихся объектов на периферии при освещении источниками с голубоватым спектром (сдвинутым в коротковолновую область) лучше, чем с красноватым (сдвинутым в длинноволновую область). Этот результат показал, что палочки (а значит, и ночное зрение) отвечают за процесс обнаружения движущихся объектов.

Таким образом, зрительную задачу водителя можно разделить как минимум на четыре: обнаружение препятствий в центральном поле зрения; восприятие распределения яркости в поле зрения; обнаружение препятствий на периферии; обнаружение движущихся объектов. В таблице 3 приведены данные о видах зрения,

Таблица 3. Виды зрения, отвечающие за выполнение зрительной задачи

| Зрительная задача | Участие колбочек | Участие палочек | Вид зрения, отвечающий за выполнение зрительной задачи |
|--|------------------|-----------------|--|
| Обнаружение препятствий в центральном поле зрения | + | – | дневное |
| Восприятие распределения яркости, попадающей в поле зрения | + | + | сумеречное |
| Обнаружение препятствий на периферии | + | + | сумеречное |
| Обнаружение движущихся объектов | – | + | ночное |

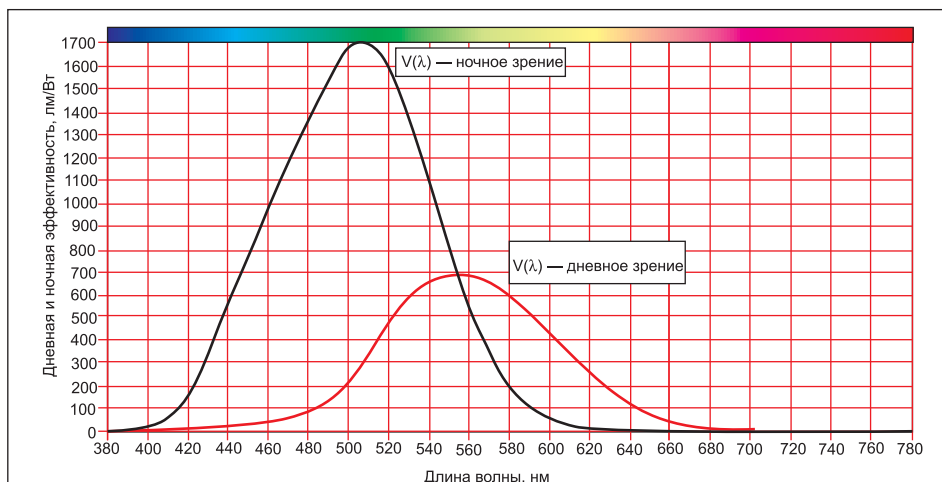


Рис. 2. Относительная спектральная чувствительность глаза для дневного $V(\lambda)$ и ночного $V_n(\lambda)$ зрения

отвечающих за выполнение каждой из зрительных задач.

При движении по ночному городу в поле зрения попадают архитектурноосвещенные объекты, яркость которых 3–30 кд/м² [4] (табл. 2). Работа глаза существенно зависит от распределения яркости в поле зрения. Из таблицы 2 видно, что из всех городских улиц с архитектурным освещением в зону сумеречного зрения попадают только относящиеся к категории В. Сюда же можно отнести парки и сады улиц категории Б. При отсутствии акцентного освещения городских объектов в эту же зону можно отнести все остальные улицы категории А и Б. При уровнях яркости более 5 кд/м² работа фоторецепторов дневного зрения вносит ощутимый вклад в зрительный процесс. Другими словами, чем выше яркость объектов, попадающих в зону видимости водителя, тем больше чувствительность колбочек и меньше — ночных фоторецепторов. Поэтому практически все улицы с ярким архитектурным освещением относятся скорее к области дневного зрения, а большинство улиц без архитектурного освещения — к сумеречному. И выбирать источники света для освещения улиц нужно, прежде всего, исходя из их визуальной эффективности в зависимости от условий зрения.

О дорожном полотне

Говоря о нормировании, нельзя не вспомнить о таком важном элементе осветительной установки наружного освещения, как дорожное полотно. В нашей стране [6] дорожное покрытие подразделяют в зависимости от наибольшего размера минеральных зерен на: крупнозернистое, мелкозернистое и песчаное. При этом светотехнические требования по яркости предъявляются только к разметке и знакам.

В светотехнической практике расчет и измерение яркости ведется [7] исходя из двух типов дорожного покрытия: мелкозернистый и шероховатый. Причем параметры асфальта были измерены в 60–70 гг. прошлого века. В этом и заключается некий казус. Современное дорожное покрытие не нормируется по светотехническим характеристикам. Например, для повышения характеристик сцепления асфальта в зависимости от технологии могут использоваться составляющие различной геометрии, что, несомненно, сказывается на светотехнических параметрах, таких как спектральная характеристика отражения и индикатриса отражения асфальта.

Для большинства типов дорожных покрытий спектральный коэффициент отражения зависит от длины волны. Согласно измерениям, проведенным Экриасом (Ekrias) и его коллегами в 2008 г. [8], спектральный коэффициент отражения большинства измеренных существующих образцов дорожного полотна имеет минимальные значения в коротковолновой части спектра и увеличивается в сторону длинноволновой. Кроме того, спектральный коэффициент отражения дорожного полотна зависит от его состава. Например, при исполь-

зовании белых примесей он может сдвигаться в сторону более коротких волн.

Итак, спектральная чувствительность глаза зависит от уровня яркости и в условиях сумеречного зрения смещается в сторону более коротких длин волн, спектральные характеристики применяемых источников света нам известны. Эти данные можно было бы использовать при разработке новых видов полотна, что позволило бы достичь нового уровня в освещении с точки зрения как улучшения качества, так и его эффективности и экономичности. Ведь каким бы эффективным светильник ни был, если полотно в большей степени отражает свет в той области, где чувствительность глаза мала, то можно ли говорить о максимальной эффективности использования светового потока в целом?

О фотометрической системе

По соглашению, принятому в 1924 г. Международной осветительной комиссией, основной функцией СЧ глаза принята функция световой эффективности $V(\lambda)$ для дневного зрения, она лежит в основе существующей фотометрической системы. СЧ показывает, насколько глаз чувствителен к тому или иному цвету (длине волны). Таким образом, существующая фотометрическая система, а следовательно, и существующие средства измерения учитывают только работу дневного зрения, ночное заведомо игнорируется. Получается, что все измерения и расчеты для наружного освещения в настоящее время проводятся только для условий дневной видимости. При этом натриевые лампы считаются самыми эффективными источниками для наружного освещения, несмотря на то, что их спектр лежит в желто-оранжевой области видимого диапазона (рис. 3в, спектр ДНаг), что не всегда является оптимальным с точки зрения СЧ глаза для сумеречного зрения.

В настоящее время соглашение 1924 г. пересматривается. Функции СЧ ночного $V_m(\lambda)$ и дневного $V(\lambda)$ зрения стандартизированы, а вот модель СЧ $V_{mes}(\lambda)$ для сумеречного зрения дорабатывается. На данный момент Международная комиссия по освещению (CIE) и Светотехническое Общество Северной Америки (IESNA) рассмотрели как минимум три модели для $V_{mes}(\lambda)$: X-модель (2004 г.), MOVE-модель (2006 г.) и mMOVE-модель (2008 г.) [5].

В X-модели $V_{mes}(\lambda)$ определяется линейным соотношением между СЧ дневного и ночного зрения с помощью параметра X, заданного для каждого уровня яркости из сумеречного диапазона. По сути, это математическая модель, согласно которой порогом перехода из сумеречной области в дневную является яркость, равная 0,6 кд/м². В основе mMove-модели лежат данные экспериментов, проведенных с участием 109 наблюдателей в нескольких местах при использовании различных зрительных критериев и экспериментальных установок. Эта модель более сложная. Коэффициент пропорциональности между СЧ дневного и ночного зрения для $V_{mes}(\lambda)$ задается в ней методом итераций для каждого уровня яркости, исходя уже из спектра источника света. При этом порогом

перехода из сумеречной области в дневную была принята яркость в 10 кд/м². Но при рассмотрении в МКО порог в 10 кд/м² посчитали избыточным — ввиду возможного усложнения фотометрической системы и с учетом того, что в наружном освещении уровни яркости, как правило, не превышают 5 кд/м². Поэтому было предложено [5] доработать эту модель и провести дополнительные эксперименты, что и было сделано. Так появилась модифицированная MOVE-модель (mMOVE-модель). Возможно, она ляжет в основу новой унифицированной фотометрической системы (УФС). Ее создание предполагает, что все величины в такой системе должны рассчитываться исходя из условий работы глаза. В настоящее

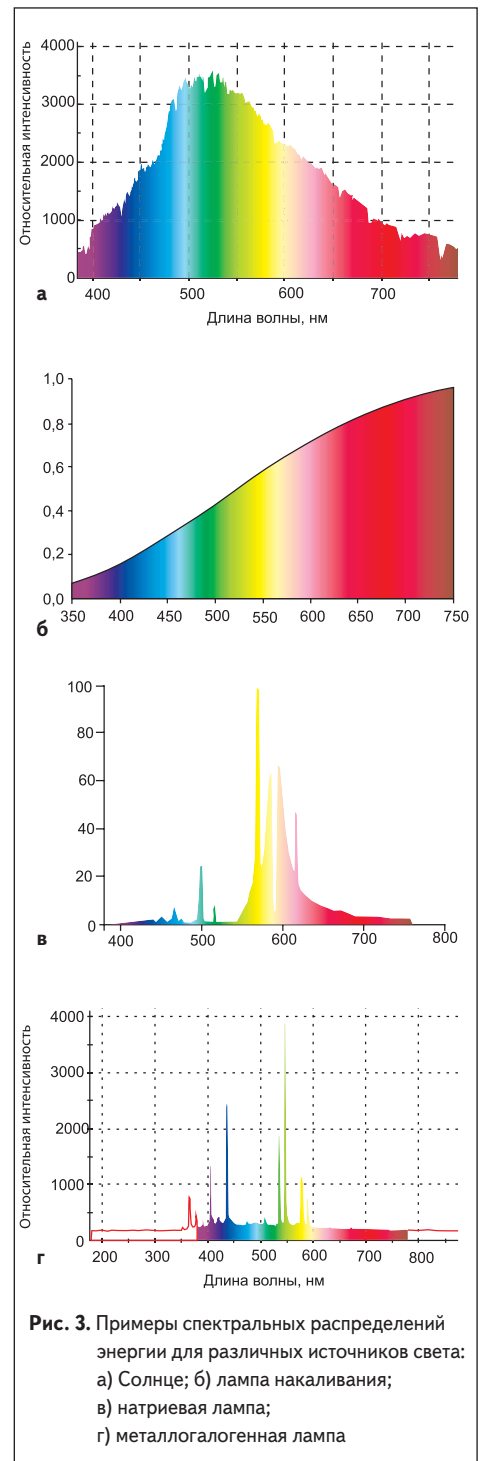


Рис. 3. Примеры спектральных распределений энергии для различных источников света: а) Солнце; б) лампа накаливания; в) натриевая лампа; г) металлогалогенная лампа

время световой поток источников света указывается в люменах для дневного зрения. Появление УФС позволит классифицировать источники света с точки зрения их реальной эффективности.

О спектре светодиода

Начнем с того, что СД, наряду с Солнцем (рис. 3а) и лампой накаливания (рис. 3б), обладает непрерывным спектром в отличие от разрядных источников света, таких как металлогалогенная (МГЛ) (рис. 3г) или натриевая (ДНаТ) лампы (рис. 3в).

В настоящее время технология создания белого света светодиодов основана на использовании синих кристаллов совместно с люминофорами. Этим и обусловлено наличие двух максимумов в спектре СД и минимума в области зеленого света. Первый максимум, как правило, лежит в синей области (440–460 нм), второй — в желто-зеленой (550–640 нм). Минимум попадает в область зеленого света (470–490 нм).

Различные производители светодиодов приводят данные по относительному распределению энергии в зависимости от длины волны при температуре +25 °С. На рис. 4 приведен пример трех различных спектров светодиодов серии XP-G (Cree) для трех диапазонов коррелированных цветовых температур (КТ_{цв}): 2600–3700; 3700–5000; 5000–10000 К. По графикам видно, что распределение энергий для различных Т_{цв} разное.

Спектр светодиода зависит от многих параметров: от типа кристалла, его температуры, угла наблюдения, но в рамках данной статьи эти вопросы затрагиваться не будут. Обратим внимание на то, что все светодиоды имеют два максимума примерно в тех же диапазонах, что и кривые СЧ глаза для ночного и дневного зрения [14]. Поэтому СД как источники света могут быть эффективными в любых условиях освещения.

Понятие «эффективного» люмена

Основные единицы светового потока — люмены — ассоциируются с дневным зрением. Все производители источников света в настоящее время приводят данные по световому потоку (по соглашению 1924 г.) в «дневных» люменах, учитывающих работу только колбочек. Как было рассмотрено выше, палочки вносят большой вклад в зрительный процесс в условиях сумеречного и ночного зрения. В связи с этим было предложено использовать «эффективные» люмены для оценки источников света при некоторых видах освещения [12]: «эффективные» люмены = «дневные» люмены × «множитель световой эффективности».

Прежде чем перейти к множителю световой эффективности, рассмотрим понятие S/P-фактора. S/P — это характеристика источника света, показывающая, какое влияние оказывает спектр источника света на работу ночного зрения. Чем выше S/P-фактор, тем эффектив-

Таблица 4. Эффективность источников света

| S/P | Характеристика | Пример источника света |
|-----|--|------------------------|
| <1 | Дневным зрением свет воспринимается более эффективно | ДНаТ |
| 1 | Свет воспринимается одинаково любым зрением | СД |
| >1 | Ночным зрением свет воспринимается более эффективно | СД, ДРЛ, МГЛ |

Таблица 5. Множитель световой эффективности СД с S/P = 2,23

| ИС | S/P | L _{мес} , кд/м ² по [5] для L _{эф} = 0,3 кд/м ² | Множитель световой эффективности (L _{мес} /L) |
|----------|------|---|--|
| СД 6500К | 2,23 | 0,3731 | 1,244 |

нее источник воздействует на фоторецепторы ночного зрения. Это означает, что для создания одного и того же уровня яркости с помощью источников света с различными спектрами может потребоваться различное количество люменов, а значит, и различное количество энергии. Взаимосвязь S/P-фактора с восприятием света для различных ИС показана в таблице 4.

На рис. 5 приведен графический пример расчета S/P-фактора для ночного и дневного зрения. Площадь спектрального распределения СД для ночного зрения в 2,23 раза больше площади для дневного зрения. К примеру, S/P-фактор натриевой лампы лежит в пределах 0,63–0,64.

Множитель световой эффективности (L_{мес}/L) определяется отношением сумеречной яркости

(L_{мес}), взятой для определенного уровня дневной яркости (L), к величине этой яркости. При этом в основе расчета сумеречной яркости лежит одна из вышеописанных моделей V_{мес}(λ). Тогда, если S/P-фактор равен 2,23, то для обеспечения визуальных условий яркости в 0,3 кд/м² потребуется в 1,24 раза меньше «эффективного» светового потока по сравнению с «дневным» (табл. 5).

S/P-фактор светодиодов

В [13] приведены результаты измерений S/P факторов для 17 СД. Было замечено, что между цветовыми координатами, а следовательно, T_{цв} и S/P, нет четкой зависимости. Источники с более «холодной» T_{цв} не всегда имеют больший фактор. Так, например, СД с T_{цв} = 6300 К могут

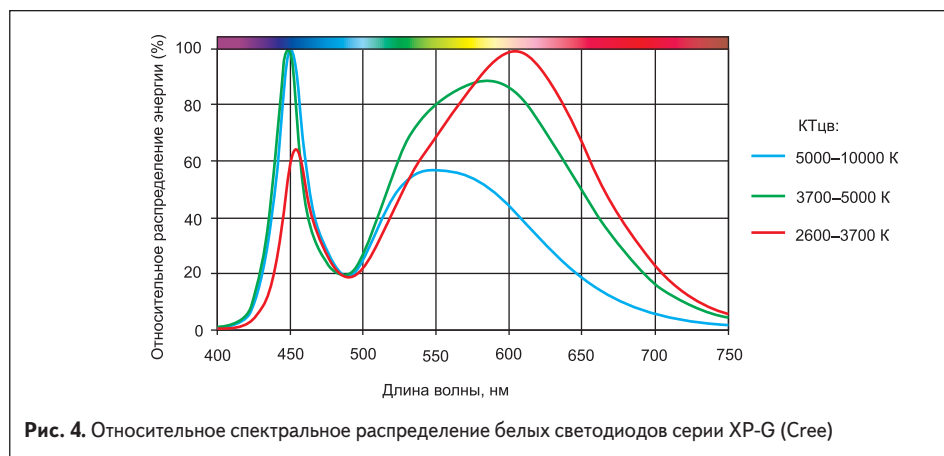


Рис. 4. Относительное спектральное распределение белых светодиодов серии XP-G (Cree)



Рис. 5. Спектральное распределение энергии СД Cree и его спектральные эффективности V_m(λ) для ночного и V(λ) для дневного зрения [10]

Таблица 6. Множители световой эффективности для СД с различными $T_{\text{цв}}$

| $T_{\text{цв}}$, К | Значение S/P | Положение цветовых координат х,у СД относительно линии ЧТ на графике МКО 1931 г. |
|---------------------|--------------|--|
| 8000 | 2,25–2,31 | Над линией ЧТ |
| 8000 | 2,04 | Ниже линии ЧТ |
| 6300 | 2,05–2,19 | Над линией ЧТ |
| 6300 | 1,69–1,96 | Ниже линии ЧТ |
| 6050 | 1,79 | На линии |
| 5500 | 1,72 | Над линией ЧТ |
| 5350 | 1,71 | Над линией ЧТ |

Таблица 7. Сравнение эффективности ИС

| Источник света (номинальный световой поток) | $T_{\text{цв}}$, К | S/P-фактор | $L_{\text{мес}}/L$ | Кол-во ИС (с учетом оптических потерь), шт. | Мощность ИС (с учетом тепловых потерь), Вт |
|---|---------------------|------------|--------------------|---|--|
| XP-G (139 лм@350 мА) | 6500 | 2,25 | 1,13 | 80 | 84,4 |
| XP-G (130 лм@350 мА) | 5000 | 1,65 | 1,24 | 95 | 99,1 |
| XP-G (107 лм@350 мА) | 3000 | 1,05 | 1,01 | 130 | 135,4 |
| ДНаТ (15000 лм) | 2100 | 0,65 | 0,92 | 1 | 150 |

иметь практически одинаковые S/P с СД, имеющими $T_{\text{цв}} = 5350$ К или 5500 К (табл. 6). Кроме того, можно предположить, что СД с цветовыми координатами, лежащими выше линии черного тела (ЧТ), имеют большие множители световой эффективности, но подтверждение этого факта требует проведения дополнительных исследований.

Как выбрать светодиод для наружного освещения?

Чтобы определиться с выбором СД для светильника наружного освещения, вернемся к спектрам источников света. Каким спектром должен обладать источник света для создания эффективной осветительной установки наружного освещения? В идеале, чем ближе излученный свет к СЧ глаза, тем лучше. Но как было рассмотрено выше, СЧ глаза — характеристика не постоянная, она зависит не только от длины волны, но и от уровня освещенности. Поэтому спектр ИС должен выбираться исходя из условий применения, и эффективность установки будет существенно зависеть от этого параметра.

В светотехнической практике основными спектральными характеристиками источников света являются цветовая температура и индекс цветопередачи. Чем ниже цветовая температура, тем цвет ближе к красному; чем выше цветовая температура, тем цвет ближе к синему. Индекс цветопередачи (R_a) характеризует уровень соответствия естественного цвета тела видимому (кажущемуся) цвету объекта при освещении его источником света с такой же коррелированной цветовой температурой. Так как в наружном освещении по понятным причинам к R_a нет особых требований и у СД он гораздо выше, чем у ДНаТ, то этот аспект рассматривать не будем.

В настоящее время светодиоды принято бинировать по цветовым координатам (или цветовой температуре) и световому потоку.

Прямой зависимости между этими параметрами и эффективностью ИС, как было рассмотрено выше, нет. Поэтому выбирать тип СД нужно по его спектральным характеристикам (S/P-фактор пока производителями не указывается), исходя из тех условий, в которых он будет применяться, например на дорогах категории А или В. Световой поток, указываемый производителем, к сожалению, не всегда отражает реальную эффективность источника света.

Сравнение эффективности светодиодов с ДНаТ

Для проведения теоретического сравнения эффективности светодиодов с ДНаТ для различных уровней яркости были выбраны СД серии XP-G с $T_{\text{цв}} = 3000; 5000; 6500$ К. Все данные, необходимые для такой оценки, взяты из спецификации компании Cree. Для данных диодов выбраны наиболее вероятные S/P-факторы: 1,05, 1,65 и 2,25 соответственно.

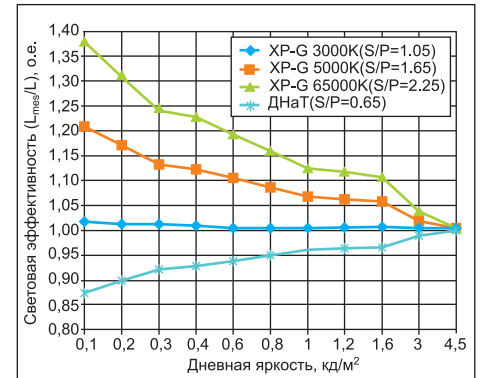


Рис. 6. Множители световой эффективности источников с различными S/P в зависимости от «дневной» яркости

На рис. 6 приведены графики для оценки визуальной эффективности выбранных светодиодов (данные предоставлены инженерным отделом Rainbow Electronics).

Проведем оценку эффективности ИС для «дневной» яркости в 0,3 кд/м² (среднее нормируемое значение для улицы категории В). Согласно приведенному графику, у ДНаТ множитель световой эффективности 0,92; у СД с S/P-факторами 1,05, 1,65 и 2,25 он равен 1,01, 1,13 и 1,24 соответственно. Заметим, что у всех рассматриваемых СД световая эффективность возрастает с понижением уровня яркости.

Световая эффективность СД с $T_{\text{цв}} = 3000$ К практически не зависит от уровня «дневной» яркости, что естественно для ИС с фактором S/P, близким к единице. Наибольшая скорость изменения $L_{\text{мес}}/L$ остальных ИС наблюдается в диапазоне между 0,1 и 0,3 кд/м², далее скорость уменьшается и в диапазоне 1–1,6 кд/м² практически не меняется. Это означает, что визуальная эффективность при низких уровнях яркости для ИС с высоким S/P-фактором больше, чем при высоких уровнях, что не противоречит теории зрения.

Сравним эффективность светодиодов XP-G с ДНаТ мощностью 150 Вт по эффективному

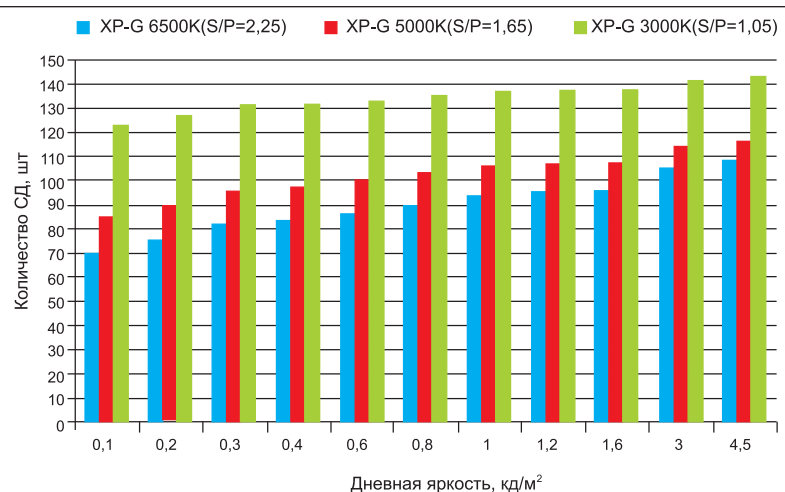


Рис. 7. Количество светодиодов XP-G, эквивалентное ДНаТ (15 000 лм), в зависимости от «дневной» яркости

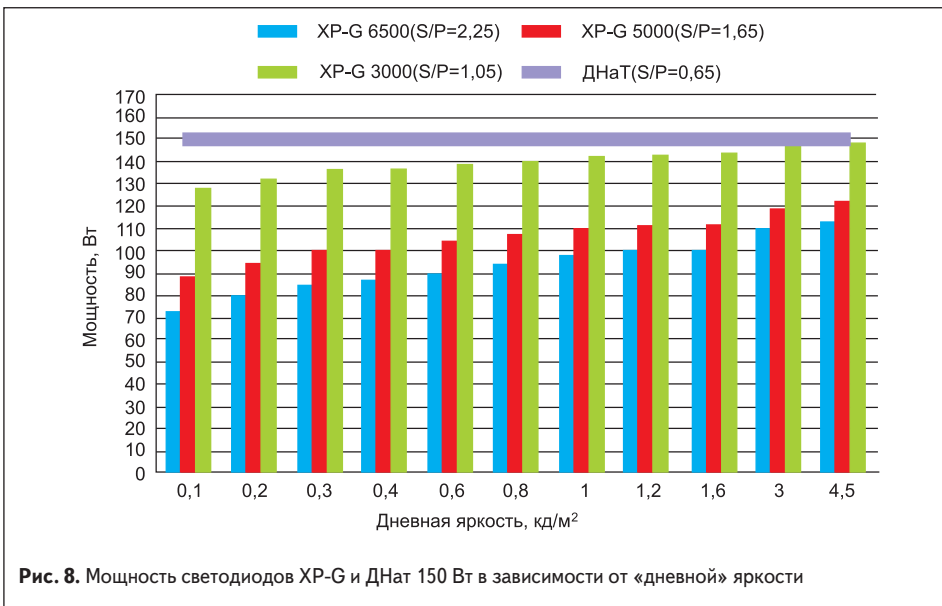


Рис. 8. Мощность светодиодов XP-G и ДНаТ 150 Вт в зависимости от «дневной» яркости

световому потоку (без учета разницы в их светораспределении) и потреблению электроэнергии. Расчет количества и потребляемой мощности для каждого типа СД проводился для $T_{\text{опр}} = +25\text{ }^\circ\text{C}$ с учетом оптических и тепловых потерь.

На графиках (рис. 7 и 8) приведены данные по количеству светодиодов и мощности для различных уровней яркостей L из сумеречного диапазона.

Из графиков видно, что экономия светового потока и электричества с помощью светодиодов по отношению к ДНаТ и обеспечение одного и того же визуального восприятия света будут различными для каждого уровня яркости (табл. 8). Согласно расчетным данным, для улиц категорий В экономия по световому потоку может составить до 41% и до 54% по электроэнергии для СД ($T_{\text{цв}} = 6500\text{ K}$, $S/P = 2,25$). Данные по экономии электроэнергии приведены без учета возможной экономии с помощью системы управления наружного освещения.

Вопрос системной мощности (ИС с пускорегулирующим аппаратом — ПРА) в рамках данной статьи не рассматривался, так как этот параметр сильно зависит от схемы включения и выбора источника питания. Что касается тепловых потерь, то на данном этапе корректно их учесть невозможно, потому как этот фактор как минимум зависит от корпуса и способа отведения тепла в светильнике. Кроме того, в расчете не учитывается светораспреде-

ление источников. Поэтому сравнение может служить только в качестве предварительной оценки комплектации будущего модуля светильника наружного освещения и для предварительной оценки его эффективности.

Об экономии электроэнергии

Итак, энергоэкономичность установки наружного освещения зависит от:

- S/P-фактора ИС. Так, СД с высоким S/P-фактором обладают лучшей эффективностью использования излученной энергии по сравнению с ДНаТ в условиях сумеречного зрения.
- Требуемого уровня яркости освещаемого объекта. Чем он ниже, тем чувствительнее ночное зрение и тем больше экономия по световому потоку и электроэнергии.

При низких уровнях яркости дорожного полотна существует возможность неожиданного появления ярких источников в поле зрения водителя (временное ослепление встречными фарами), поэтому к вопросу экономии электроэнергии за счет использования ИС с голубоватым спектром нужно подходить очень осторожно.

Заключение

В первой статье цикла [1] были рассмотрены возможные пути развития нормирования

и говорилось о поисках новых критериев. Рассмотренный метод «множителей световой эффективности» пока не является общепринятым и находится в разработке. Он опирается на большое количество экспериментальных данных и имеет веское основание, чтобы быть узаконенным в европейских нормах, а затем, возможно, и в российских. Очевидно одно: светодиоды имеют эффективное распределение энергии в условиях ночного и сумеречного зрения. И если не учитывать этот факт, то нормируемые уровни яркости увеличатся естественным образом за счет большей эффективности осветительных установок наружного освещения (УНО) улиц на базе светодиодов с высоким S/P-фактором. Учет этого фактора позволит повысить энергоэффективность УНО при обеспечении существующего сегодня качества освещения.

Литература

1. Ильина Е., Стратиенко А. Наружное светодиодное освещение улиц городов. Некоторые аспекты принципов нормирования установок наружного освещения // Полупроводниковая светотехника. 2010. № 3.
2. Мешков В. В. Основы светотехники: Учебное пособие для вузов. Ч. 1. М.: Энергия. 1979.
3. <http://www.webexhibits.org/causesofcolor/1G.html>.
4. СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение.
5. Viikary M., Ekrias A., Eloholma M., Halonen L. Modelling spectral sensitivity at low light levels based on mesopic visual performance // Clinical Ophthalmology. 2008. № 2(1).
6. ГОСТ 9128-97. «Смеси асфальтобетонные, дорожные, аэродромные и асфальтобетон».
7. ГОСТ 26824-86. «Здания и сооружения. Методы измерения яркости».
8. Ekrias A., Ylinen A.-M., Eloholma M., Halonen L. Effects of pavement lightness and colour on road lighting performance // Proceedings of the CIE International Symposium on Road Surface Photometric Characteristics: Measurement Systems and Results. Torino. 2008.
9. Antis S. M., Cavanagh P. A. A minimum motion technique for judging equiluminance. Color Vision: Physiology & Psychophysics. London: Academic Press. 1983.
10. Источник <http://www.olino.org/us/articles/2009/12/14/sp-ratio>
11. Josefowicz J., Ha D. Human Eye Response to LED Light: Scotopic versus Photopic Light and Vision. LED Roadway Lighting Ltd.
12. Lewin I. Lumen effectiveness multipliers for outdoor lighting design // IES paper. № 50.
13. Van Derlodske J., Bullough J. D., Watkinson J. Spectral effects of LED Forward Lighting // TLA. Lighting Research Center. 2005. № 2.
14. Varady G., Fekete J., Sik-Lanyi C., Schanda J. Mesopic vision, optimized illumination. Hungary. Univesity of Pecs, Univesity of Pannonia.
15. Jayaraman T. Report on Street Lighting Application A comparison between HPSV and LED. SECO Instruments Pvt. Ltd.

Таблица 8. Данные по экономии светового потока и электроэнергии для XP-G по сравнению с ДНаТ

| Категория улицы | Диапазон дневной яркости, кд/м² | $T_{\text{цв}}$, К | S/P | Экономия по световому потоку, % | | Экономия по электроэнергии, % | |
|-----------------|---------------------------------|---------------------|------|---------------------------------|------|-------------------------------|------|
| | | | | мин | макс | мин | макс |
| В | 0,2–0,4 | 5000 | 1,65 | 20 | 27 | 41 | 45 |
| | | 6500 | 2,25 | 30 | 41 | 49 | 54 |
| Б | 0,6–1,0 | 5000 | 1,65 | 11 | 17 | 35 | 39 |
| | | 6500 | 2,25 | 16 | 25 | 43 | 47 |
| А | 0,8–1,6 | 5000 | 1,65 | 14 | 9 | 35 | 37 |
| | | 6500 | 2,25 | 21 | 14 | 42 | 45 |