

Екатерина Ильина | [iei@rtcs.ru](mailto:iei@rtcs.ru)

# Наружное светодиодное освещение автомагистралей и улиц городов

## Способы оценки световой эффективности светильников наружного освещения

**В предыдущих статьях цикла были рассмотрены вопросы, касающиеся зрительного восприятия, а также применимости светодиодов для наружного освещения. Цель данной публикации: рассмотрение новых критериев оценки эффективности светильника наружного освещения, основанных на современных представлениях о зрительной системе человека; выявление требований к светильнику, которые необходимо учесть еще на стадии его разработки; выбор метода нахождения границ применимости светильника наружного освещения. И первое, на чем мы остановимся, — понятие эффективности светильника.**

### Эффективность источника света

Эффективность источника света зависит от двух параметров: световой отдачи и визуальной эффективности (ВЭ). Как уже говорилось в предыдущей статье цикла [1], ВЭ зависит от конкретных условий применения источника света в конкретной задаче. Для наружного освещения характерным условием является сумеречное зрение. ВЭ определяется, исходя из значения S/P-фактора и уровня дневной яркости [3]. Обозначение S/P расшифровывается как scotopic/photopic (ночной/дневной). Световая отдача светодиодов (СИД) серии XP (Cree) в настоящее время менее 160 лм/Вт, значение S/P для цветовых температур 2600–7500 К лежит в пределах 1,1–2,3.

### S/P-фактор

S/P-фактор характеризует отношение световой отдачи источника света в условиях ночного зрения к световой отдаче в условиях дневного. В прошлой статье цикла было замечено, что S/P-фактор зависит от спектра источника света, при этом четкой зависимости от цветовой температуры нет. Но было высказано предположение, что S/P зависит от местоположения бина СИД относительно линии черного тела (ЧТ) — находится он выше или ниже.

### Что такое бин?

Бин (англ. bin — элемент дискретизации) — некоторая элементарная единица, неделимый элемент, частица минимально возможного размера. Для светодиодов этим словом обозначается диапазон параметра, минимальный для данной системы сортировки [5]. Все ведущие производители бинуют светодиоды по цветности и по све-

товому потоку. Пример разбиновки по цветности СИД серии XP для применения в наружном освещении приведен на рис. 1.

### От чего зависит S/P-фактор?

Светодиоды имеют характеристики не в виде спектра, а в виде групп (бинов) по световому потоку и цветовым координатам. Для определения зависимости S/P-фактора от бина по цвету и по световому потоку был произведен анализ спектров 102 образцов XP-E (Cree), измеренных в одних и тех же условиях. Были рассмотрены СИД с  $T_{цв} = 2600–7500$  К.

При поиске зависимости S/P от  $T_{цв}$  были выбраны образцы СИД из бинов, лежащих на линии ЧТ, остальные бины отсекались, так

как было замечено, что бины, расположенные выше линии ЧТ, имеют большие значения S/P, чем те, которые находятся ниже (рис. 2).

Конечно, более правильно говорить о зависимости S/P-фактора от цветовых координат  $x, y$  (МКО 1931): значение S/P растет с увеличением координаты  $y$  и уменьшением координаты  $x$ . На рис. 3, 4 показано, как меняется S/P в зависимости от координат.

Но это менее удобно в применении, чем  $T_{цв}$ . Поэтому на рис. 2 для удобства приведена полученная зависимость S/P от  $T_{цв}$  для бинов, лежащих на линии ЧТ, рекомендуемых для применения в наружном освещении.

Как было упомянуто выше, СИД бинируются и по световому потоку. Это означает, что в любом бине по цветности есть СИД с различной световой отдачей. Как же меняется S/P-фактор в зависимости от этого параметра? Оказалось, что СИД с меньшими значениями светового потока в 61% случаев имели большие значения S/P. Но какой-то явной зависимости выявлено не было, поэтому можно сделать вывод, что S/P зависит в большей степени от координат цветности.

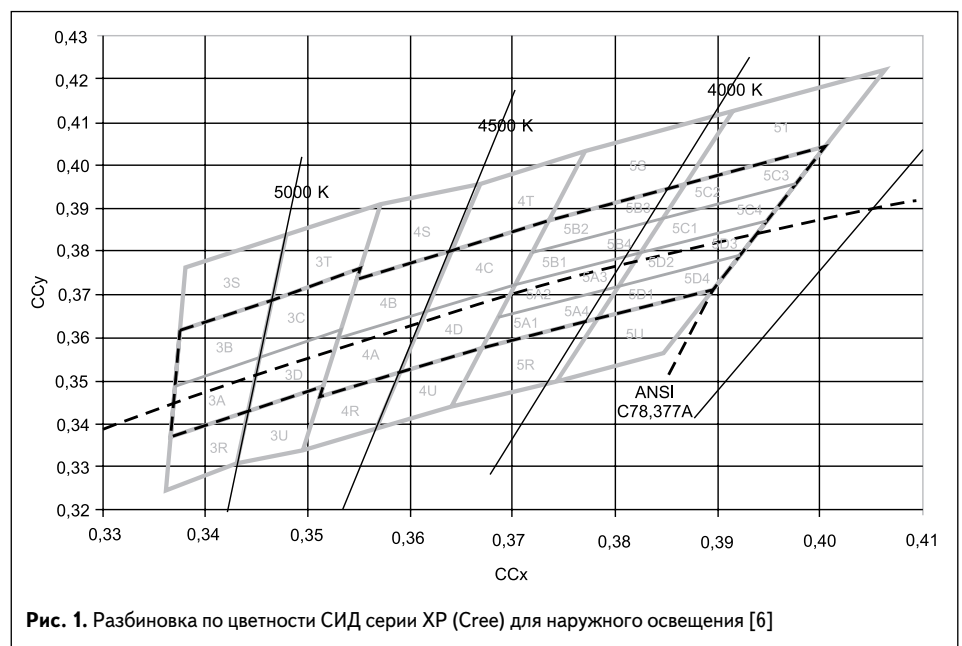
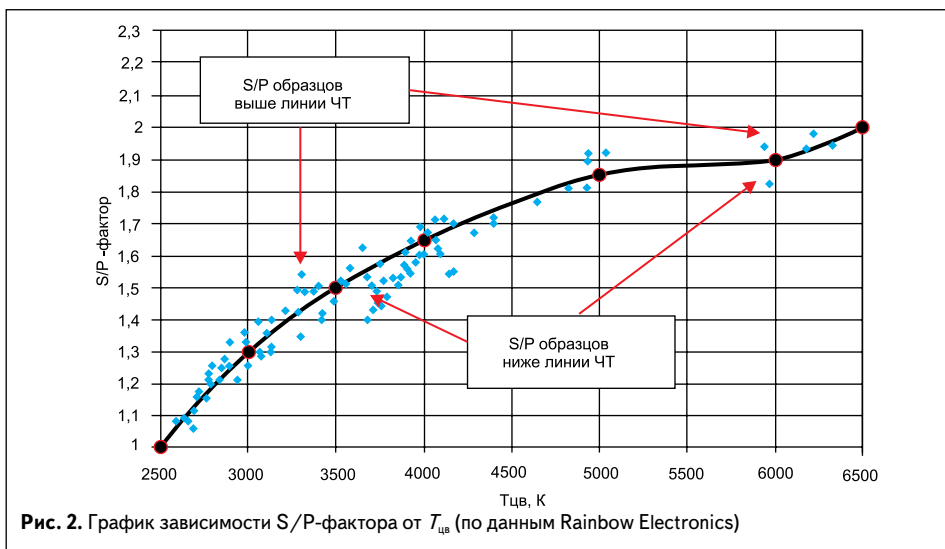


Рис. 1. Разбиновка по цветности СИД серии XP (Cree) для наружного освещения [6]



### О нормах наружного освещения

В настоящее время, согласно [2] (табл. 1), основная нормируемая характеристика в освещении улиц, дорог и городских площадей с регулярным транспортным движением — это норма средней яркости покрытий. Средняя горизонтальная освещенность нормируется только для освещения улиц, дорог и городских площадей, расположенных в «северной строительно-климатической зоне азиатской части России и севернее 66° северной широты в европейской части России». Вот пример городов, где нормируется освещенность: Мурманск, Норильск, Воркута, Салехард и другие, расположенные за Полярным кругом. А чуть ниже Полярного круга, например в Архангельске, Сургуте, Ханты-Мансийске, уже нормируется яркость.

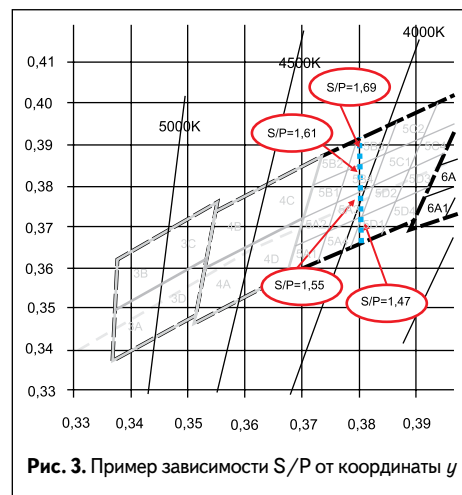
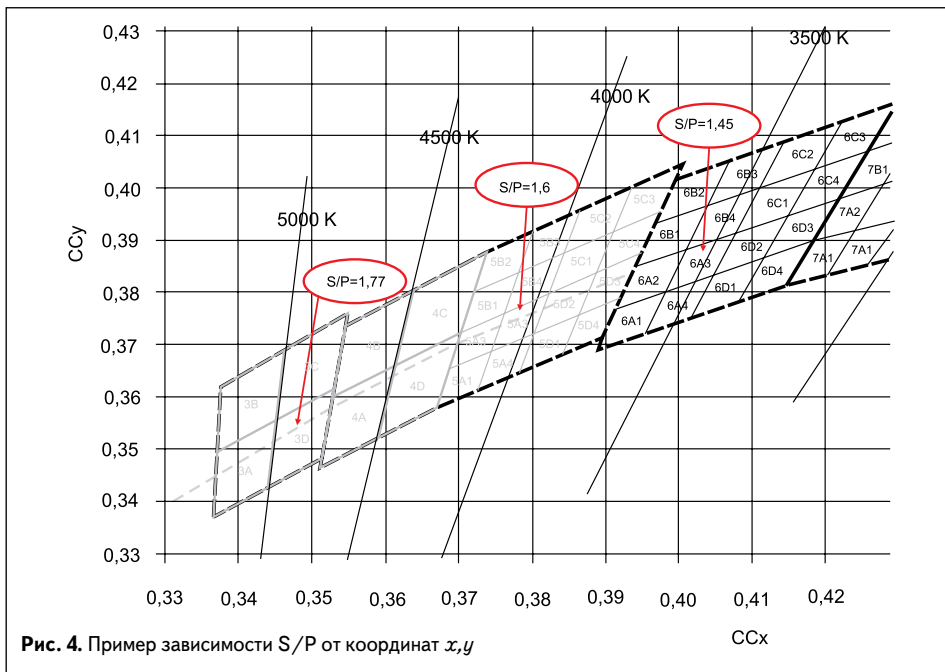
Что касается норм средней яркости, то в СНиП 23-95-2010 [2], которые должны вступить в действие в 2011 г., используемые категории улиц и уровни яркости будут изменены и при-

ближены к европейским. Это означает, что новые стандарты уже сегодня рекомендуется учитывать при разработке новых светодиодных светильников, потому как цикл такой разработки является длительным. Кроме того, выбирать категории улиц и уровни яркости нужно исходя из новых условий.

В рамках предыдущей статьи цикла была рассмотрена теоретическая визуальная эффективность светодиодного освещения в зависимости от S/P-фактора светодиодов с различной  $T_{цв}$  в сравнении с ДНАТ для нормируемых в настоящее время значений яркости. Приведем практический пример последовательности проведения такой оценки.

### Как оценивать визуальную эффективность

Для оценки ВЭ необходимо определить уровень сумеречной яркости. Сумеречная яркость эквивалентна общепринятой дневной яркости с учетом влияния спектрального со-



ста излучения источника света на визуальное восприятие в условиях сумеречного освещения. Что касается самой терминологии «сумеречная», то она не является общепринятой и вводится в рамках данной статьи для удобства. Для определения этого параметра, исходя из значения S/P-фактора и уровня дневной яркости, можно воспользоваться таблицей из [4] (рис. 5) или соответствующим калькулятором для расчета сумеречной яркости.

Множитель световой эффективности определяется отношением сумеречной яркости к дневной. Это, по сути, весовой коэффициент, показывающий, во сколько раз увеличивается или уменьшается ВЭ источника света в условиях сумеречного зрения. Чтобы провести практическую оценку ВЭ, разработчику све-

S/P	Дневная яркость, кд/м <sup>2</sup>		
	0,3	1	3
0,25	0,2331	0,8735	2,8108
0,35	0,2430	0,8914	2,8372
0,45	0,2525	0,9090	2,8632
0,55	0,2616	0,9262	2,8888
0,65	0,2706	0,9431	2,9141
0,75	0,2792	0,9597	2,9391
0,85	0,2877	0,9760	2,9637
0,95	0,2959	0,9921	2,9880
1,05	0,3040	1,0079	3,0120
1,15	0,3119	1,0234	3,0356
1,25	0,3197	1,0387	3,0590
1,35	0,3273	1,0538	3,0822
1,45	0,3348	1,0686	3,1050
1,55	0,3421	1,0833	3,1276
1,65	0,3493	1,0978	3,1499
1,75	0,3565	1,1121	3,1720
1,85	0,3635	1,1262	3,1939
1,95	0,3704	1,1401	3,2155
2,05	0,3772	1,1539	3,2368
2,15	0,3840	1,1675	3,2580
2,25	0,3906	1,1810	3,2789

Рис. 5. Фрагмент таблицы для определения эквивалентной сумеречной яркости [4]. (Пример определения сумеречной яркости (штриховая линия) эквивалентной дневной яркости  $L = 1$  кд/м<sup>2</sup> показан для S/P = 0,65; 1,55; 1,75 и 2,05)

тодиодного светильника требуется понимать, для какой категории дорог и для какого уровня яркости он его делает. Требуется подобрать цветовую температуру (бин светодиода), поскольку, как было упомянуто выше, визуальная эффективность будет зависеть и от этого параметра.

### Пример расчета визуальной эффективности для улицы категории Б

Нормируемые значения яркости для улиц этой категории лежат в пределах  $0,4\text{--}1\text{ кд/м}^2$ . Проведем сравнение для трех вариантов СИД с  $T_{\text{цв}} = 3500, 4500$  и  $6000\text{ К}$ . Определяем S/P-фактор для каждого значения  $T_{\text{цв}}$  (табл. 1): получаем 1,5; 1,76 и 1,9 соответственно. Вычисляем величину сумеречной яркости (рис. 5) для уровней дневной яркости 0,4; 0,6; 0,8; и  $1,0\text{ кд/м}^2$ . Данные для каждого типа рассматриваемых СИД и для ДНаТ ( $S/P = 0,65$ ) приведены в таблице 2, графики показаны на рис. 6.

Определяем множители световой эффективности (табл. 2, графики на рис. 7).

Таким образом, СИД с  $T_{\text{цв}} = 4500\text{ К}$  будет эффективнее ДНаТ в  $1,11/0,94 = 1,18$  раза при норме яркости в  $1\text{ кд/м}^2$ . Следовательно, при разработке светильника на СИД, эквивалентного по светораспределению светильнику с ДНаТ, для создания одинакового уровня нормируемой яркости потребуется в  $1,18$  раза меньше светового потока.

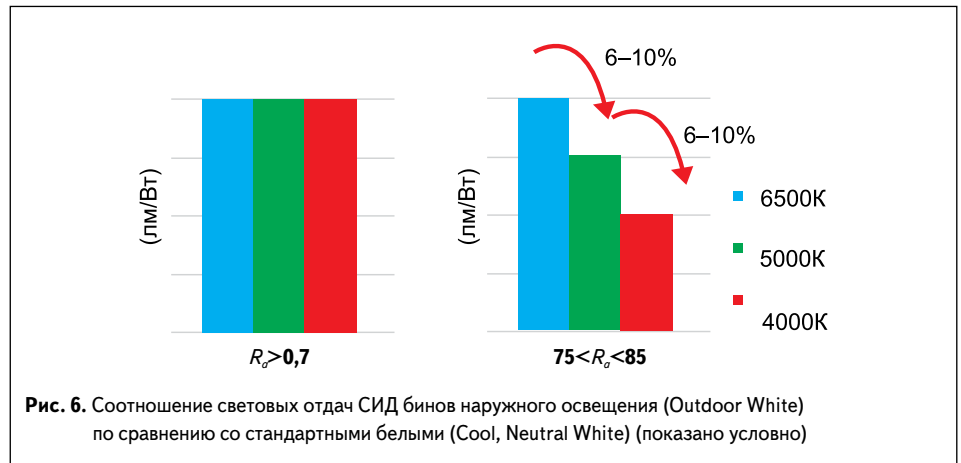
**Таблица 1.** Значения сумеречной яркости для СИД и ДНаТ

Источник света	S/P	Дневная яркость, $\text{кд/м}^2$			
		0,4	0,6	0,8	1
ДНаТ	0,65	0,37	0,56	0,75	0,94
СИД 3500 К	1,5	0,45	0,66	0,87	1,08
СИД 4500 К	1,76	0,47	0,69	0,90	1,11
СИД 6000 К	1,9	0,48	0,70	0,92	1,13

**Таблица 2.** Множители световой эффективности

Источник света	S/P	Дневная яркость, $\text{кд/м}^2$			
		0,4	0,6	0,8	1
ДНаТ	0,65	0,91	0,93	0,94	0,94
СИД 3500 К	1,5	1,11	1,10	1,08	1,08
СИД 4500 К	1,76	1,17	1,14	1,13	1,11
СИД 6000 К	1,9	1,20	1,17	1,15	1,13

На данный момент в разрабатываемых светильниках чаще всего используются светодиоды с  $T_{\text{цв}} > 6000\text{ К}$ . Почему так происходит? Считается, что светодиоды с  $6000\text{ К}$  более эффективны, чем с  $4500\text{ К}$  и поэтому требуется меньше светодиодов и оптики, а отсюда и стоимость конечного изделия снижается. Согласно данным, приведенным компанией Cree (рис. 6), световая отдача светодиодов с  $T_{\text{цв}} = 4500$  и  $6000\text{ К}$  для бинов наружного освещения (рис. 1) практически одинакова при индексе цветопередачи  $R_a$  не менее 70. У светодиодов стандартного белого света (Cool, Neutral, Warm White) световая отдача меняется в зависимости от цветовой температуры, причем чем выше индекс цветопередачи, тем ниже световая отдача. С точки зрения ВЭ из табл. 2 видно, что разница множителей световой эффективности между этими



**Рис. 6.** Соотношение световых отдач СИД бинов наружного освещения (Outdoor White) по сравнению со стандартными белыми (Cool, Neutral White) (показано условно)

СИД невелика, особенно при уровнях дневной яркости в  $0,8\text{--}1\text{ кд/м}^2$ . Кроме ВЭ учтем тот факт, что дорожное покрытие отражает свет в длинноволновой части спектра лучше, чем в коротковолновой. Спектральная чувствительность глаза с понижением уровня яркости сдвигается в коротковолновую область. Из этого следует, что применение СИД с  $T_{\text{цв}} = 6000\text{ К}$  может приводить к большему ослеплению, чем с  $4500\text{ К}$ , поскольку глаз будет более чувствителен к излученному свету. Более холодный свет будет хуже отражаться от дорожного покрытия, и разница отношений уровня яркости дорожного полотна к яркости источников, попадающих в поле зрения водителя, в первом случае может оказаться больше. Возможно, этим можно объяснить результаты многочисленных социальных опросов, согласно которым предпочтение отдавались светодиодным светильникам с  $T_{\text{цв}}$  не более  $5000\text{--}5500\text{ К}$ .

### Эффективность использования световой энергии

Эффективность использования световой энергии — это параметр, характеризующий светильник и его способность эффективно распределять свет в пространстве и на рабочей поверхности. Основная величина, с помощью которой характеризуется сегодня эта эффективность, — коэффициент использования светового потока. В настоящий момент оценка эффективности светильников с помощью этого коэффициента устарела. Почему? Коэффициент использования по световому потоку — это доля светового потока, излученного источником света, упавшая на рабочую поверхность. Обратим внимание на рабочую поверхность: она может иметь различные размеры в зависимости от ширины дороги и шага установки опор. Возьмем светильник: пусть он имеет такое светораспределение, которое обеспечивает нормируемые характеристики (среднюю яркость по полотну, достаточную равномерность вдоль каждой полосы и общую равномерность) как на дороге шириной проезжей части в две полосы, так и в три. Что тогда получается? В первом случае коэффициент использования всегда будет меньше, так как часть светового потока уйдет на освещение отсутствующей третьей полосы. Поэтому доля излученного светового потока,

попадающего на двухполосную рабочую поверхность, будет ниже, чем во втором случае. Получается, что светильник будет иметь разный коэффициент использования для дорог различной ширины. Таким образом, коэффициент использования светильника по световому потоку — величина относительная и не совсем информативная. Хотелось бы обратить внимание, что, согласно [3], в разрабатываемом СНиП 23-95-2010 этот параметр регламентироваться не будет. Тогда возникает вопрос, как же оценить разрабатываемый светильник наружного освещения? Какие параметры использовать для сравнения различных светильников? Рассмотрим один из возможных методов оценки, примененный Rainbow Electronics. В чем основная идея предложенного метода, как вообще можно оценивать светильник? Давайте рассмотрим данный вопрос с различных точек зрения (табл. 3).

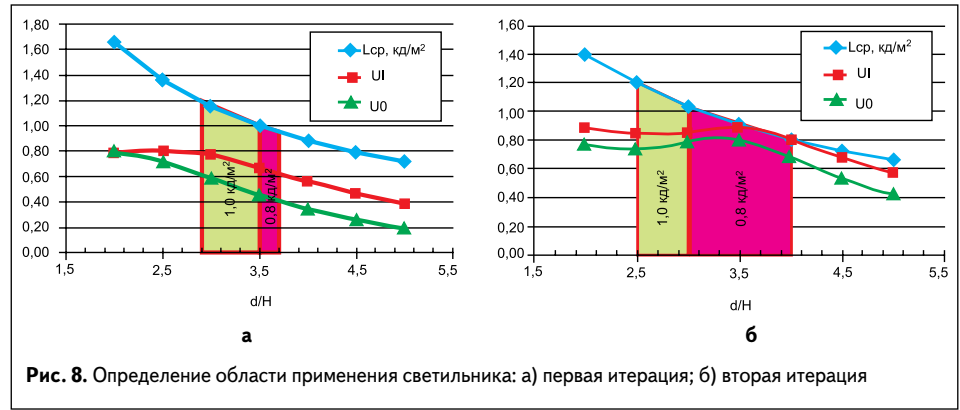
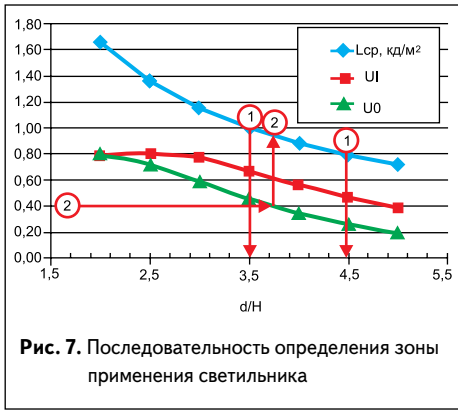
**Таблица 3.** Различные требования к светильникам

Точка зрения	Требования к светильникам
Потребитель	Качественное освещение
Проектировщик	Нормы по освещению дороги определенной ширины, с определенной высотой опор и некоторым диапазоном шага их установки
Разработчик	Нормы по освещению для некоторых диапазонов дорог различной ширины, с различными шагом и высотой установки опор и т.д.

Таким образом, из таблицы 3 видим, что перед разработчиком задача ставится более широко. Именно из этих соображений метод оценки светильника базируется на оценке с точки зрения выполнения нормы для некоторого диапазона дорог.

### Графический метод оценки эффективности

Прежде чем рассмотреть предлагаемый метод оценки, разберемся, какие параметры лежат в его основе. Во-первых, это параметры светильника: пространственное распределение сил света (КСС), световой поток,  $T_{\text{цв}}$ . Во-вторых, область применения: категория дороги; уровни средней яркости ( $L_{\text{ср}}$ ); коэффициенты неравномерности яркости ( $U_1$  — неравномерность по полосе движения,  $U_0$  — общая неравномерность). И, наконец, параметры дороги: шири-



на проезжей части (количество полос движения), шаг установки опор ( $d$ ), высота установки светильников ( $H$ ), тип дорожного покрытия.

В основе метода лежит светотехнический расчет. Рассчитываются вышеуказанные светотехнические нормируемые параметры для оцениваемого светильника при различных  $d/H$ . При этом следует брать определенное значение высоты установки ( $H = \text{const}$ ), потому что эта величина, как правило, не меняется, меняется именно шаг между опорами в зависимости от реальных условий. Далее строятся зависимости  $L_{cp} = f(d/H)$ ,  $U_1 = f(d/H)$  и  $U_0 = f(d/H)$ .

Последовательность определения области применения для нормы  $0,8 \text{ кд/м}^2$  приведена на рис. 7. Обратим внимание, что по уровню средней яркости этот светильник можно было бы применять для диапазона  $d/H = 3,5\text{--}4,5$ . По показателю неравномерности диапазон применимости существенно сужается. Это означает, что если  $H = 10 \text{ м}$ , то по яркости нормы будут выполняться для опор с  $d = 35\text{--}45 \text{ м}$ , а по неравномерности только для  $d = 35\text{--}36 \text{ м}$ , что явно говорит не в пользу выбранного светильника.

При разработке светильника указанный метод можно использовать следующим способом: если область на средней яркости широка и основная проблема в неравномерности, то нужно дорабатывать светораспределение светильника, чтобы получить максимально возможную зону применимости. На рис. 8а показаны диапазоны применимости для рассматриваемого примера светильника, на рис. 8б — тот, который может

получиться в результате доработки его светораспределения.

### Заключение

Эффективность светильника наружного освещения зависит:

1. От применяемого источника света и его спектральных характеристик. В сентябре в Европе вступили в действие рекомендации CIE 191:2010 Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance по сумеречному освещению — это означает, что первый шаг уже сделан.
2. От светораспределения светильника и его возможности обеспечить нормируемые показатели для некоторого диапазона дорог. Предложенный метод оценки можно использовать при разработке светильников наружного освещения, а также сравнивать несколько светильников по диапазонам применимости. Но следует учитывать, что с увеличением диапазонов применимости эффективность светильника падает, поэтому нужно искать разумный баланс.

### Литература

1. Ильина Е. Наружное освещение автомагистралей и улиц городов. Применимость светодиодов в наружном освещении с точки зрения визуального восприятия // Полупроводниковая светотехника. 2010. № 4.

2. СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение.
3. Черняк А. Ш. Обзор стандартов для светодиодного освещения // LED FORUM 2010.
4. Eloholma M., Halonen L. MOVE-mesopic Optimisation of Visual Efficiency. Performance based model for mesopic photometry. Espoo, Finland. 2005.
5. Подгорбунских А. Основы: что такое бин и кит? <http://light.rtcs.ru/articles>
6. Cree XLamp XP Family LED. Binning and Labeling. [http://www.cree.com/products/pdf/XLampXP\\_B&L.pdf](http://www.cree.com/products/pdf/XLampXP_B&L.pdf)
7. Baum D., McClear Mark. SSL Not As Simple As It Seems: Things To Know and Things To Consider // Street lighting consortium. 2010.