

Баланс между энергией, окружающей средой и зрительной работоспособностью*

К. НАРИСАДА

Университет Chukyo**

С начала XX века развитие науки, техники и технологий привели к значительному росту световой отдачи ИС и эффективности ОУ. Благодаря этому цена искусственного освещения была существенно уменьшена [1].

Снижение стоимости освещения вызвало расширение областей применения искусственного освещения, в глобальном масштабе произошел переход от внутреннего освещения к наружному, а уровни освещенности возрастили из года в год. Эти тенденции привели к огромному росту затрачиваемой на освещение электроэнергии.

Рост потребления электроэнергии на освещение частично ускорил обострение глобальных проблем, связанных с нехваткой энергии. В последние десятилетия проявились и некоторые отрицательные эффекты, вызываемые искусственным освещением [2–4], а именно:

- ухудшение зрительной среды из-за блеска [4];
- помехи астрономическим наблюдениям, вызванные увеличением яркости ночного неба [2–4];
- экологические проблемы, обусловленные чрезмерным рассеянием света в окружающей среде [4];
- атмосферные загрязнения, связанные с выработкой электрической энергии для освещения [4].

Для снятия остроты перечисленных проблем необходимо снизить потребление энергии на освещение, уменьшить неоправданное рассеяние света в ОУ и при этом не ухудшить качество освещения.

Прошлые и настоящие подходы к решению этих задач основывались на повышении световой отдачи ИС, электрической и оптической эффективности ОУ с целью снижения энергопотребления при обеспечении необходимых уровней освещенности. Данный подход, применяющийся на протяжении последнего века, дал много положительных результатов.

Следующий подход должен заключаться в снижении уровней освещенности без ухудшения качества освещения.

Начиная с первого энергетического кризиса 1973 г., в некоторых странах для отдельных областей применения

произошло снижение рекомендуемых уровней освещенности [5].

Однако, реализуя данный подход, необходимо опираться на твердое научное обоснование предпринимаемых мер и каким-то образом компенсировать снижение уровней освещенности за счет улучшения других характеристик освещения. Необходимо избегать снижения уровней освещенности только с целью сокращения потребления электроэнергии, иначе нормы освещения потеряют общественное доверие и возникнут серьезные отрицательные последствия.

В рекомендациях, основанных на научных исследованиях и практическом инженерном опыте, содержится ряд критериев оценки зрительной работоспособности (Visual Performance) и/или зрительного комфорта (Visual Comfort). Каждый критерий отражает либо минимальный уровень, либо допустимый предел, позволяющий обеспечить необходимое качество освещения.

Однако относительная значимость каждого критерия изменяется в зависимости от области применения или природы освещения. Ограничим наше обсуждение только той областью ос-

вещения, где наиболее важным критерием является зрительная работоспособность. Характерной областью такого рода является дорожное освещение.

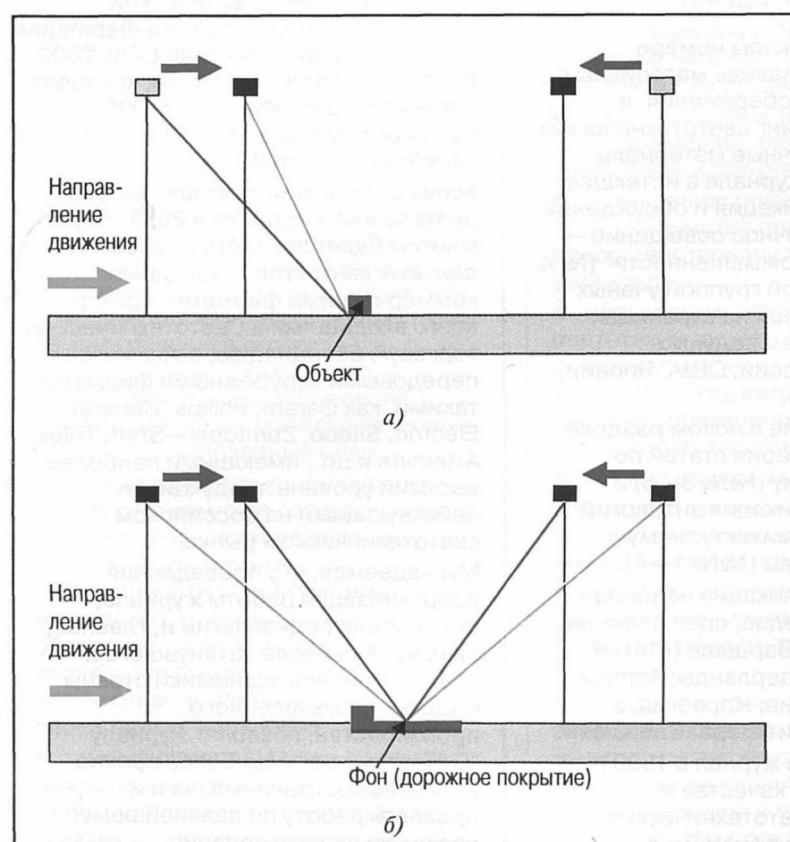
Рекомендации по дорожному освещению определяют, по крайней мере, три параметра, влияющих на зрительную работоспособность [6]: среднюю яркость дорожного покрытия (L_r), общую равномерность (U_o), и допустимый уровень блеска.

Существует общее соглашение о том, что для выполнения рекомендаций необходимо, чтобы любой из трех перечисленных выше параметров не выходил за пределы соответствующего диапазона допустимых значений. В итоге на практике стремятся получить как можно более высокие значения средней яркости дорожного покрытия и равномерности и ограничить блескость в той степени, в какой это экономически оправдано.

Вследствие этого проектировщики имеют тенденцию проектировать освещение с "избыточным" качеством. Чтобы избежать "избыточности" качества, необходимо установить компромиссное соотношение между критериями. Если такое компромиссное соотношение установлено, тогда представляется возможность осуществить разумный выбор световых параметров в соответствии с поставленными целями.

Например, чтобы обеспечить зрительную работоспособность, можно выбрать более высокий уровень освещенности, но при меньшей степени равномерности и с более высокой блескостью.

Рис. 1.
Изменение
условий
освещения
при изменении
положения
светильников
а — видимая
поверхность
объекта;
б — дорожное
покрытие,
создающее
фон для объекта
наблюдения



* Перевод с английского В.Н. Степанова.

** Hirakata, Kuzuha, Asahi 2-6-12, Osaka, 573-1111 Japan.

скостью, либо наоборот, более низкий уровень освещенности при более высокой равномерности и меньшем слепящем действии.

В XXI веке критерии освещения должны быть интегрированы в одном показателе качества освещения, и для этого необходимо провести соответствующие исследования. И это должно быть одной из задач, стоящих перед МКО в новом столетии.

В данной статье на примере дорожного освещения и с учетом последних данных о зрительном восприятии кратко обсуждены возможности нахождения компромиссного соотношения между критериями, определяющими зрительную работоспособность.

Зрительная работоспособность определяется скоростью и точностью выполнения зрительной задачи [7]. Она возрастает при снижении величины пороговой разности яркости (ПРЯ), характеризующей зрение испытуемого, выполняющего зрительную работу, а также при увеличении разности яркости (ΔL) между объектом наблюдения (L_o) и его фоном (L_b).

Для исследования того, как зрительная работоспособность зависит от условий освещения, используется такая характеристика, как уровень видимости (Visibility Level, VL). Уровень видимости определяется как отношение разности яркостей объекта и фона ($\Delta L = |L_o - L_b|$) к ПРЯ, или как отношение величины контраста объекта с фоном ($K = \Delta L / L_b$) к пороговому контрасту объекта ($K_{\text{пор}}$).

С целью упрощения рассуждений мы не будем принимать во внимание другие важные факторы, влияющие на зрительную работоспособность: размеры объекта, возраст наблюдателя и т. д.

Как уже отмечалось выше, уровень видимости может быть определен по ПРЯ или пороговому контрасту. Однако, чтобы установить связь между уровнем видимости и условиями освещения, необходимо выбрать наиболее подходящую характеристику. Выбор определяется характером изменений яркости объекта (L_o) и фона (L_b) при изменении уровня освещенности.

Например, яркость букв и других изображений на бумаге и яркость самой бумаги изменяются в одинаковой пропорции при изменении уровня освещенности. Яркостной контраст (K) букв на фоне бумаги постоянен и не зависит от освещенности. В этом случае удобнее пользоваться пороговым контрастом ($K_{\text{пор}}$).

При изменении светового потока ламп в ОУ в одинаковой пропорции изменяются значения яркости в точке дорожного покрытия (L_p) и яркости объекта (L_o). При этом яркостной контраст объекта в любой точке дороги остается неизменным. В этом случае



Рис. 2. "Эффект черной дыры", возникающий при въезде в тоннель днем

уровень видимости удобнее выражать через пороговый контраст.

Однако, варьирование потока лампы — это не единственный способ изменения освещения дороги. На уровень освещенности можно влиять путем изменения расположения светильников относительно дороги, а именно, изменяя высоту установки светильников, расположение светильников, и/или расстояние между светильниками вдоль дороги.

На рис. 1 показано изменение расстояния от светильника до объекта на дороге и угол, под которым свет падает на объект. Яркость видимой части объектов (L_o), расположенных в разных местах на дороге, изменяется по разному при изменении уровня освещенности. Аналогичным образом, как показано на рис. 1, б, изменяются расстояние от светильника и угол падения света на участок, формирующий непосредственный фон для объекта. В результате изменения уровня освещения распределение яркости дорожного покрытия изменяется сложным образом. В разных местах дороги по разному происходят изменения яркости участков, образующих фон для объектов наблюдения.

Таким образом, при изменении условий освещения изменения яркостного контраста объектов, расположенных в разных местах дороги, происходят по разному. По этой причине нельзя принимать пороговый контраст за основу для оценки уровня видимости в установках дорожного освещения. Правильнее будет использовать критерий ПРЯ.

Проблемы, связанные с критерием "уровень видимости" (VL)

Зависимость между ПРЯ (ΔL_{\min}) и яркостью адаптации (L_b) является основой для оценки зрительной работоспособности.

С целью упрощения и унификации условий проведения экспериментов, исследования, на которых строились существующие рекомендации по освещению, по большей части выполнялись с равномерными яркостными полями [7, 8].

В экспериментах равномерная яркость выполняет двойкую роль. Во-первых, роль яркостного стимула, обеспечивающего адаптацию зрения наблюдателя, а во-вторых, роль яркости фона, на котором воспринимается объект. Таким образом, при равномерных полях яркость адаптации и яркость фона всегда равны. В большинстве реальных ситуаций зрительные поля являются неравномерными. Благодаря быстрым движениям глаз яркость изображений, проецируемых на сетчатку, меняется по мере того, как наблюдатель изменяет направление своего взгляда и фиксирует различные участки неравнояркого поля зрения.

Яркость адаптации, которая определяется фотохимическими процессами в сетчатке, не может следовать моментальным изменениям интенсивности яркостных стимулов. Таким образом, зрение наблюдателя адаптируется к усредненной во времени яркости неравномерного поля. С другой стороны, яркость фона изменяется мгновенно при переводе взгляда с объекта в любое другое место в неравномерном поле.

Следовательно, для неравноярких полей яркость адаптации зрения на-

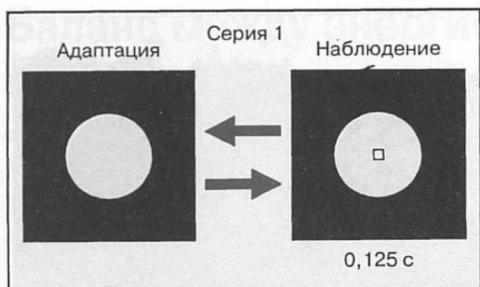


Рис. 3. Изменение поля зрения в экспериментах первой серии

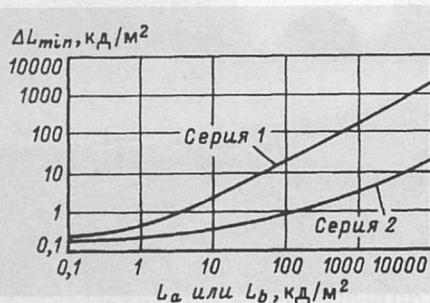


Рис. 4. Результаты экспериментов первой и второй серий



Рис. 5. Изменение поля зрения в экспериментах второй серии

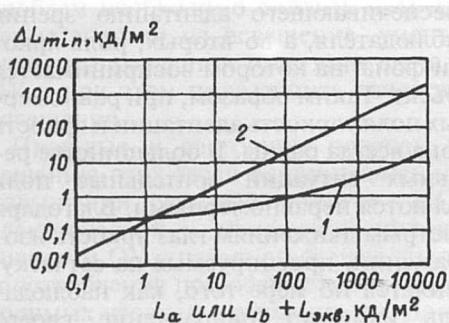


Рис. 6. Зависимость пороговой разности яркости от яркости адаптации (1) и фона (2)

блудателя и яркость фона, по отношению к которому воспринимается объект, не всегда равны между собой. По этой причине результаты экспериментов с равномерными полями нельзя использовать для изучения уровня видимости в различных точках неравнояркого поля.

Для исследования ПРЯ в условиях неравноярких полей необходимо иметь

независимые соотношения между ПРЯ и яркостью адаптации, а также между ПРЯ и яркостью фона.

Для разделения влияния яркости адаптации и яркости фона на ПРЯ были проведены две серии экспериментов [9]. Первоначально исследования были направлены на изучение "эффекта черной дыры", возникающего при въезде в тоннель в дневное время [9, 10]. Необходимо было выяснить, при каких условиях при подъезде к тоннелю водитель, глаза которого адаптированы к высокому уровню яркости, способен воспринимать объекты в темном тоннеле (рис. 2). Позднее результаты этих экспериментов нашли применение и для оценки неравноярких полей, присущих дорожному освещению [11–13].

В первой серии экспериментов (см. левую часть рис. 3) глаза наблюдателя предварительно адаптировались к яркости небольшого кругового поля с угловым размером 30'. Размер кругового поля был выбран таким, чтобы можно было исключить возможные влияния вуалирующей яркости, обусловленной более крупным полем окружения.

В центре круглого поля с яркостью L_b , к которой были предварительно адаптированы глаза наблюдателя, в течение 0,125 с предъявлялся прямоугольный тест-объект с угловым размером 7'.

На рис. 4 показаны результаты экспериментов первой серии для условия $L_a = L_b$.

Значения ПРЯ приведены на рис. 4 с учетом полевого фактора, равного 3 для условий дорожного освещения [11–13], а не 4, как это принято для условий автомобильного головного освещения [14].

Во второй серии экспериментов условия предварительной адаптации были такими же, как в первой серии (см. левую часть рис. 5). Зрение наблюдателя также предварительно адаптировалось к яркости небольшого круглого поля.

В момент предъявления тест-объекта круглое поле исчезало. Как показано на рис. 5, наблюдателю в течение 0,125 с на черном фоне предъявлялся такой же объект, как в экспериментах первой серии. Так как объект предъявлялся лишь на очень короткое время, предполагалось, что зрение наблюдателя сохраняло состояние адаптации к яркости круглого поля, независимо от реальной величины яркости фона (L_b). Кривая 2 на рис. 4 отражает результаты экспериментов. Величина яркости адаптации (L_a) во второй серии опытов была такой же, как в первой серии, но яркость фона (L_b) практически была равна нулю. Значения ПРЯ приведены на рис. 4 с учетом полевого фактора, равного 3.

Как видно из кривых рис. 4, при равных значениях яркости адаптации значения ПРЯ, полученные в первой серии экспериментов, значительно превышали значения, полученные в опытах второй серии.

В обеих сериях экспериментов яркость адаптации и время предъявления объекта были равными. Различие заключалось в существовании или отсутствии яркости фона в момент предъявления объекта. Это значит, что различия в значениях ПРЯ были обусловлены мгновенным изменением яркости фона в момент предъявления объекта.

В первой серии опытов объект наблюдался на фоне с яркостью L_b , которая была равна яркости адаптации L_a , то есть измеренные значения ПРЯ (ΔL) отражают объединенное влияние яркости адаптации и яркости фона.

Во второй же серии опытов объект воспринимался на фоне с практически нулевой яркостью ($L_b = 0$). Это означает, что измеренные величины ПРЯ определялись только яркостью адаптации. Следовательно, разница между значениями ПРЯ, полученными в опытах первой и второй серий, равна величине ПРЯ, обусловленной яркостью фона, которая в свою очередь равна яркости адаптации. Расчет разницы в значениях ПРЯ в двух сериях экспериментов был проведен во всем диапазоне изменения яркости адаптации (см. рис. 4).

Кривая 2 на рис. 6 иллюстрирует расчетную зависимость между яркостью фона и ПРЯ. В действительности это прямая линия, т. е. ПРЯ, изменяется пропорционально яркости фона. Кривая 2 на рис. 4, иллюстрирующая зависимость между яркостью адаптации и ПРЯ, еще раз воспроизведена на рис. 6.

Пороговая разность яркости для произвольной точки неравнояркого поля равна сумме ПРЯ, определяемых яркостью адаптации (кривая 1), и фона (кривая 2 на рис. 6).

Эквивалентная вуалирующая яркость (L_{eq}), обусловленная действием блескных источников [15], накладывается на поле зрения и суммируется с яркостью фона [11–13].

Изменения направления взгляда в неравномерном поле зрения, вызываемые движениями глаз, приводят к тому, что каждое мгновение происходит изменение эквивалентной вуалирующей яркости. Как и в случае быстрых изменений яркости изображений на сетчатке, яркость адаптации не успевает за мгновенными изменениями эквивалентной вуалирующей яркости [13].

Из кривой 1 на рис. 6 видно, что ПРЯ изменяется незначительно в широком диапазоне изменений яркости адаптации, в отличие от зависимости ее от яркости фона (кривая 2). Это значит, что

погрешности в оценке яркости адаптации не приводят к существенным ошибкам, поэтому влиянием изменений эквивалентной вуалирующей яркости на яркость адаптации можно пренебречь, за исключением экстраординарных случаев. Поэтому в инженерной практике для оценки яркости адаптации можно использовать среднюю яркость той части поля зрения, где находится большая часть объектов наблюдения, пренебрегая величиной накладываемой на это поле зрения эквивалентной вуалирующей яркостью.

Пороговая разность яркости для точки в неравноярком поле может быть найдена путем суммирования величин ПРЯ, обусловленных яркостью адаптации и яркостью фона в этой точке.

Величина ПРЯ для любой точки неравнояркого поля зрения оценивалась на основе данных измерений, приведенных на рис. 6, по следующей процедуре [9, 10]:

- 1) измерить или рассчитать среднюю яркость (L_r) той части поля зрения, где сосредоточены основные объекты наблюдения;

- 2) по кривой 1 определить величину ПРЯ, которая соответствует найденной яркости адаптации (L_a);

- 3) измерить или рассчитать яркость непосредственного фона (L_b) объекта;

- 4) измерить или рассчитать величину эквивалентной вуалирующей яркости (L_{eq}) для характерных направлений объекта;

- 5) просуммировать яркости фона и эквивалентной вуалирующей пелены ($L_b + L_{eq}$) для данной точки поля;

- 6) по кривой 2 определить величину ПРЯ, которая соответствует яркости, найденной на этапе (5);

- 7) сложить величины ПРЯ, найденные на этапах (2) и (6). Это и есть величина ПРЯ (ΔL_{min}) для данной точки поля зрения.

Для упрощения процесса нахождения ПРЯ были построены кривые, приведенные на рис. 7. При построении кривых каждая величина ПРЯ, соответствующая яркости адаптации, была просуммирована с величиной, найденной с помощью кривой 2 на рис. 6, для широкого диапазона яркости фона. На рис. 7 яркость адаптации выступает в качестве параметра.

Чтобы найти величину ПРЯ, необходимо выполнить следующую процедуру:

- 1) определить величину яркости адаптации (L_a);

- 2) выбрать кривую, соответствующую найденной яркости адаптации, на рис. 7;

- 3) для данной точки поля зрения рассчитать суммарную величину яркости фона и эквивалентной вуалирующей яркости ($L_b + L_{eq}$);

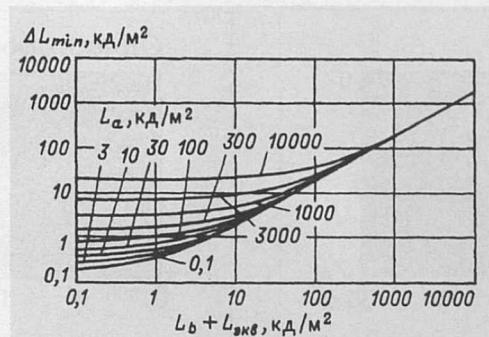


Рис. 7. Зависимость пороговой разности яркости от яркости фона и эквивалентной вуалирующей яркости

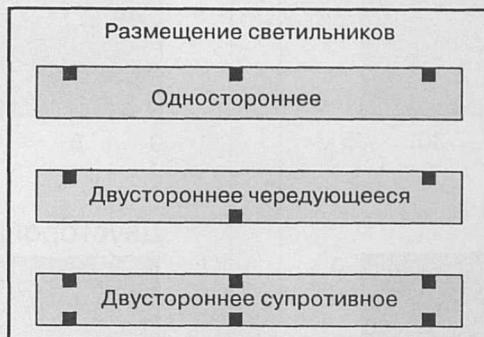


Рис. 8. Типовое размещение светильников

4) с помощью соответствующей кривой определить величину ПРЯ, которая соответствует сумме $L_b + L_{eq}$.

Повторяя описанный выше процесс, можно найти значения ПРЯ для многих точек поля зрения и построить кривые ее распределения для неравномерных полей.

С целью упрощения выкладок, составляющая эквивалентной вуалирующей яркости, обусловленная слепящим действием, в дальнейшем исключена из рассмотрения.

Для сравнения уровней видимости в различных условиях дорожного освещения была выбрана дорога с полосой движения шириной 7 м, и с асфальтобетонным покрытием типа С2. Рассматривались три вида расстановки светильников, показанные на рис. 8, с шагом 35 м и высотой установки 10 м. Для всех вариантов дорог средняя яркость покрытия (L_r) принималась равной 1 кд/м².

Используя широко известный метод расчета дорожного освещения, были рассчитаны значения яркости (L_p) в различных точках дороги. Затем были построены кривые распределения яркости дорожного покрытия. На рис. 9 приведены примеры распределения яркости дорожного покрытия для трех типовых расстановок светильников.

Крестом отмечены точки, где яркость дорожного покрытия минимальна. Для этих условий рассчитывался показатель общей равномерности освещения $U_o = L_{min} / L_r$. Для разных

расстановок светильников получены следующие значения равномерности:

одностороннее размещение: $U_o = 0,26$
двустороннее чередующееся: $U_o = 0,52$
двустороннее супротивное: $U_o = 0,73$.

В дальнейшем приведенные значения степени равномерности для различных расстановок светильников оставались неизменными.

Принимая во внимание взаимное расположение объекта и той части дорожного покрытия, которая формирует фон в перспективном поле зрения водителя, для каждого положения объекта были определены значения яркости фона (L_b). Применяя процедуру определения ПРЯ, описанную выше, на основе данных о средней яркости дорожного покрытия (L_r), являющейся оценкой яркости адаптации (L_a), и яркостях определенных точек (L_p) дорожной поверхности, представляющих оценки яркости фона (L_b), были найдены значения ПРЯ для различных точек дороги и построены соответствующие распределения. На рис. 10 приведены примеры распределения величины ПРЯ для трех типов расстановок светильников. Как видно из рисунка, распределения ПРЯ для различных расстановок светильников сильно отличаются между собой, хотя средняя яркость дорожного покрытия везде одинакова и равна 1 кд/м².

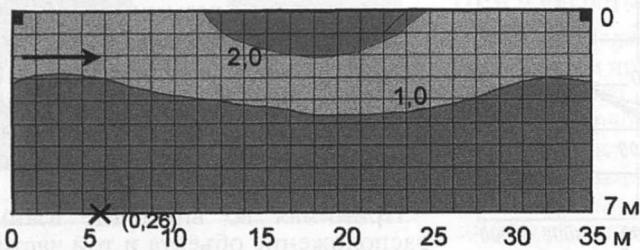
Треугольником на рисунке отмечено место, где величина ПРЯ максимальна, а крестом — место, где яркость дорожного покрытия минимальна. Следует отметить, что положения треугольников и крестов сильно отличаются друг от друга.

Как уже отмечалось ранее, уровень видимости определяется ПРЯ и разностью яркостей объекта и фона, на котором наблюдается объект. В условиях дорожного освещения яркость объекта, как правило, ниже яркости дорожного покрытия, являющегося фоном, а уровень видимости возрастает по мере того, как объект становится темнее [11–13].

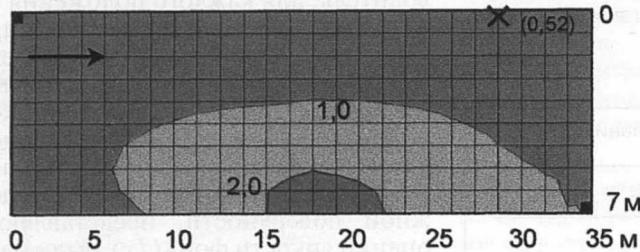
Яркость объекта уменьшается по мере снижения коэффициента отражения (ρ) объекта или вертикальной освещенности (E_v) на видимой поверхности объекта. Для тест-объектов дорожного освещения коэффициент отражения принимается равным 20 %. В этом случае объект получается темнее фона и обеспечивается минимальные условия для безопасности дорожного движения. Более подробно выбор значения коэффициента отражения обосновывается в работах [11, 12].

Распределение вертикальной освещенности зависит от светораспределения, высоты установки, шага и типа расстановки светильников. По этой причине видимость объекта зависит от пространственного размещения светильников.

Одностороннее



Двустороннее чередующееся



Двустороннее супротивное

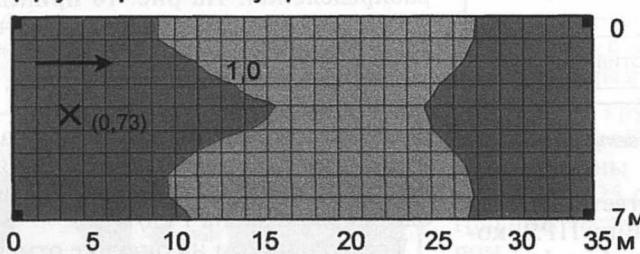


Рис. 9. Распределение яркости дорожного покрытия при различных размещениях светильников

Для трех типов расстановки светильников были выполнены расчеты вертикальной освещенности поверхности тест-объекта (с размером $0,2 \text{ м} \times 0,2 \text{ м}$), расположенного в различных точках дороги. Далее была определена яркость объекта (L_o) с коэффициентом диффузного отражения 20 % с использованием формулы:

$$L_o = \rho E_v / \pi.$$

Для многих точек дороги были выполнены расчеты разности яркости между фоном и объектом. На основе полученных данных были построены соответствующие распределения величины ΔL .

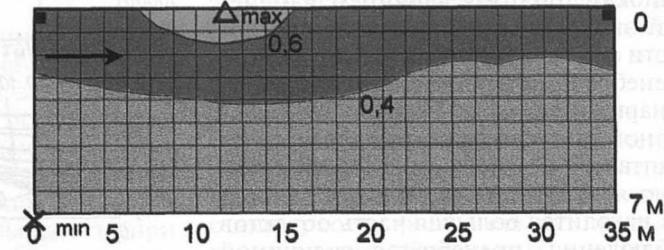
Для различных точек дороги на основе известных величин ПРЯ и разности яркости между объектом и фоном (ΔL) были рассчитаны значения уровня видимости (VL). Для трех типов расстановки светильников и при одинаковом значении средней яркости дорожного покрытия были рассчитаны и построены кривые распределения уровня видимости (рис. 11). Крестом отмечены точки с минимальным значением яркости дорожного покрытия. Как и ожидалось, распределения уровня видимости для разных расстановок све-

тильников отличались друг от друга, хотя средняя яркость дорожного покрытия была одинаковой. На рисунке видно, что положения треугольных меток, соответствующих минимальным значениям уровня видимости, существенно отличались от положения меток в виде креста, показывающих точки с наименьшими значениями яркости дорожного покрытия.

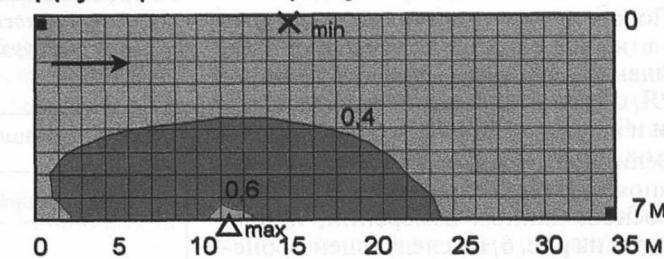
Чтобы облегчить сравнение распределений уровня видимости, был введен "коэффициент площади", равный отношению площади, в пределах которой уровень видимости выше 1, к общей площади.

На рис. 12 для трех типов расстановки светильников приведено сравнение значений средней яркости дорожного покрытия, при которых получены одинаковые значения "коэффициента площади", равного 70 %. Как видно из рис. 12, чтобы "коэффициент площади" был равен 70 %, при одностороннем размещении светильников средняя яркость дорожного покрытия должна быть равной $1,25 \text{ кд}/\text{м}^2$; для двустороннего чередующегося размещения — $0,8 \text{ кд}/\text{м}^2$; а для двустороннего противоположного размещения — $0,54 \text{ кд}/\text{м}^2$. Результаты сравнения сви-

Одностороннее



Двустороннее чередующееся



Двустороннее супротивное

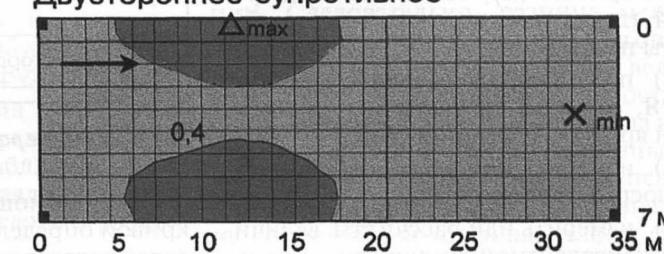
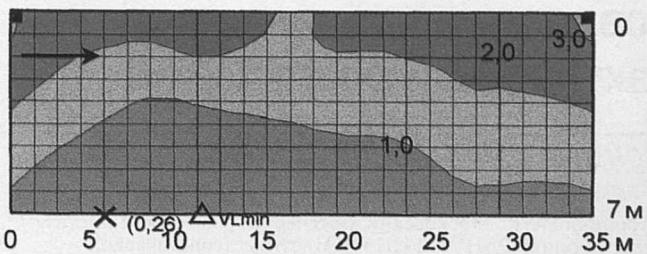


Рис. 10. Распределение пороговой разности яркости для различных размещений светильников

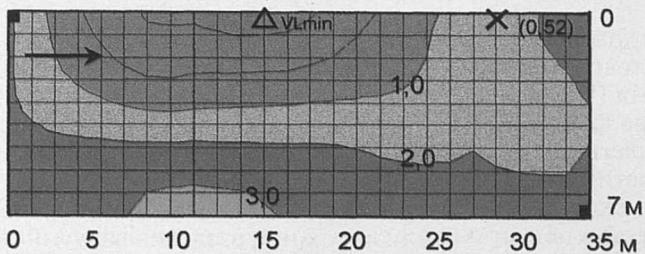
детельствуют, что средняя яркость дорожного покрытия не является единственным фактором, определяющим уровень видимости или уровень зрительной работоспособности в установках дорожного освещения. Одно и то же значение "коэффициента площади" может быть получено при более низкой средней яркости дорожного покрытия за счет определенного размещения светильников (или более благоприятного распределения вертикальной освещенности и/или яркости дорожного покрытия).

Как уже отмечалось выше, общая равномерность (U_o) неодинакова при различных расстановках светильников. Величина "коэффициента площади" снижается по мере уменьшения показателя общей равномерности. Следует отметить, что места с минимальной яркостью дорожного покрытия, отмеченные крестами на рис. 11 и 12, не совпадают с местами минимальных значений уровня видимости, отмеченными треугольниками. Это значит, что показатель общей равномерности ($U_o = L_{min} / L_r$) не является адекватной мерой оценки влияния равномерности распределения яркости дорожного по-

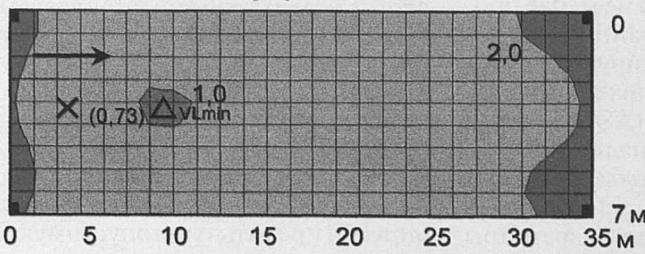
Одностороннее



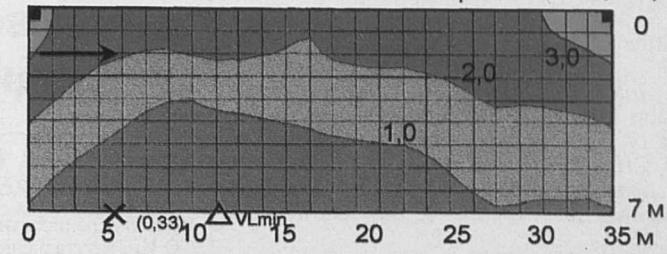
Двустороннее чередующееся



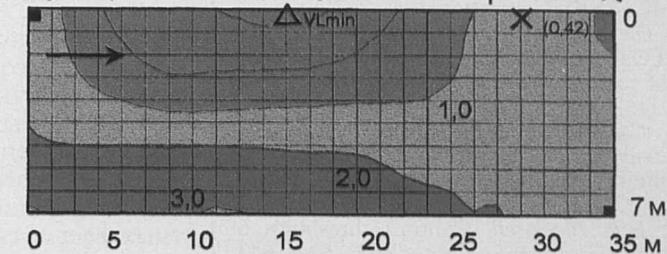
Двустороннее супротивное



Одностороннее



Двустороннее чередующееся ($L_r = 0.8 \text{ cd/m}^2$)



Двустороннее супротивное ($L_r = 0.54 \text{ cd/m}^2$)

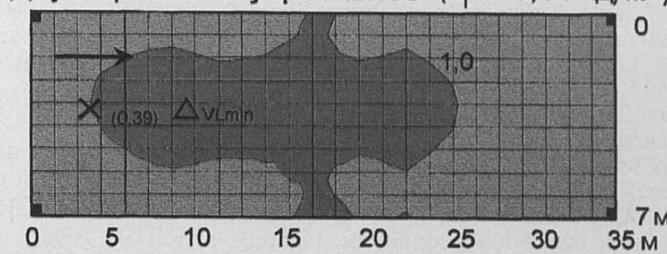


Рис. 11. Распределение уровня видимости при различных размещениях светильников

Рис. 12. Распределение уровня видимости при "коэффициенте площади" 70 %

крытия на уровень видимости или зрительной работоспособности.

На основе проведенных исследований была установлена возможность снижения уровней освещенности (и получения соответствующей экономии электроэнергии) без ухудшения качества освещения.

1) Было отмечено, что результаты, полученные в большинстве фундаментальных исследований восприятия, проводившихся с равномерными полями, нельзя применять для условий неравноярких полей, встречающихся на практике, для которых различны величины яркости адаптации и яркости фона.

2) На основе выполнения двух серий экспериментов удалось разделить величину пороговой разности яркости на составляющие, отражающие влияние яркости адаптации и яркости фона. На основе результатов проведенных опытов был предложен метод определения ПРЯ для любой точки неравнояркого поля.

3) С помощью предложенного метода были проведены сравнения распределений уровня видимости (как меры зрительной работоспособности) в

условиях дорожного освещения для трех типов расстановки светильников.

4) Чтобы облегчить сравнение распределений уровня видимости, было введено понятие "коэффициент площади".

5) Было показано, что при различных расстановках светильников одно и то же значение "коэффициента площади" (а именно 70 %) может быть обеспечено при различных значениях средней яркости дорожного покрытия. Иными словами, за счет правильного размещения светильников можно обеспечить заданный уровень "коэффициента площади" и при этом снизить среднюю яркость дорожного покрытия.

6) Отсюда следует вывод, что средняя яркость дорожного покрытия не является единственным фактором, определяющим зрительную работоспособность. Важную роль играют такие факторы, как распределение яркости дорожного покрытия и вертикальной освещенности (последнее, в свою очередь, зависит от пространственного размещения светильников), светораспределение светильников и светоотражающие свойства дорожных покрытий.

7) На основе сравнения распределений уровня видимости найдены практические соотношения между уровнем освещенности, распределением яркости, распределением вертикальной освещенности и блескостью.

8) Было установлено, что показатель общей равномерности не является адекватной мерой выражения качества освещения.

Данная статья первоначально была подготовлена для 24-й пленарной сессии МКО (Варшава, 24–30 июня 1999) и называлась "Баланс между энергией, окружением и зрительной работоспособностью". Она была представлена автором 26 июля и опубликована в Трудах Сессии МКО [16].

В настоящий вариант статьи были внесены изменения (несколько новых рисунков), учитывающие замечания, высказанные во время устного представления.

Данная статья не была бы написана без помощи Й. Каракавы (Yoshinori Karasawa, Matsushita Electric Works, Kadoma, Осака, Япония), который выполнял расчеты и обрабатывал данные для построения графиков, отражающих характеристики дорожного освещения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. Kano, Y. Hirota, *Lighting Handbook*, ed.: S. Yamaguchi, Illuminating Engineering Institute of Japan, Ohm-sha, Tokyo, Japan, 1987.

2. International Astronomical Union/Commission Internationale de l'Eclairage, Guide lines of Sites for astronomical observatories, AIU/CIE 1-1984.

3. Commission Internationale de l'Eclairage, Guidelines for Minimizing Sky Glow, CIE 126-1997.

4. Environment Agency of Japan, Guidelines for reducing light pollution, 1998.

5. E. Mills, N. Borg, *Rethinking Light Levels*, IAEEL Newsletter, 7, 4-7, 1998.

6. For example, Commission Internationale de l'Eclairage, Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic, CIE 115-1995.

7. Commission Internationale de l'Eclairage, An analytic model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance, CIE 19/2.1-1981.

8. H.R. Blackwell, Contrast thresholds of human eye, *J. Opt. Soc. Amer.* 42, 624-643, 1946.

9. K. Narisada, Y. Yoshimura, Adaptation luminance of the driver's eyes at the entrance of tunnel, an objective method, Proceedings of CIE International Symposium on Measure of Road Lighting Effectiveness, Karlsruhe, 56, 1977.

10. Commission Internationale de l'Eclairage, Tunnel Entrance Lighting — A survey of fundamentals for determining the lumiance in the threshold zone, CIE 61-1984.

11. K. Narisada, Perception in complex field under road lighting conditions, *Lighting Res. Technol.* 23, 123-131, 1995.

12. K. Narisada, Perception under road lighting conditions with complex surroundings, *Journal of Light & Visual Environment*, 25, 5-14, 1995.

13. K. Narisada, T. Saito, Y. Karasawa, Perception and road lighting design, Proceedings of SANCI International Conference at Durban, 83-86, 1997.

14. Roper, V.J. Howard, E.A. Seeing with motorcar headlamps, *Trans. Am. Illum. Engng. Soc.* 33, 417 1938.

15. Holladay, L.L. The fundamentals of glare and visibility, *J. Opt. Soc. Am.* 12, (4) S. 271-319, 1926.

16. K. Narisada, Balance between Energy, Environment and Visual Performance, Proceedings of the 24 Session of the CIE at Warsaw, Poland, Vol. 1 — Part 1, 17-22, Commission Internationale de l'Eclairage, 133-1999.

Катодолюминесцентные источники света на основе автоэлектронной эмиссии: концепция практической реализации

Ю.В. ГУЛЯЕВ, В.Ф. ЕЛЕСИН, Н.И. СИНИЦЫН, А.Л. СУВОРОВ,
Ю.П. ТИМОФЕЕВ

Институт радиотехники и электроники РАН*, Московский инженерно-физический институт**, СО Института радиотехники и электроники РАН***, ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики****, Физический институт РАН им. П.Н. Лебедева*****

Относительно старая и довольно очевидная идея создания катодолюминесцентных источников света (КЛИС) [1] долгие годы была предана фактически полному забвению из-за легко доказываемой бесперспективности практической реализации, хотя в некоторых частных, весьма специфических областях она и использовалась (например, в рекламных щитах).

Новое обращение к этой идеи было связано с рассмотрением не менее прозрачной идеи использования в КЛИС для получения бомбардирующих люминофоров электронов явления автоэлектронной эмиссии (АЭЭ) [2, 3]. Даже самый простой анализ показывал возможность в несколько раз превзойти в КЛИС на основе АЭЭ (КЛИС-АЭЭ) основные параметры ламп накаливания: коэффициент полезного действия, эффективность, срок службы, устойчивость к колебаниям в сети, механическим вибрациям, отсутствие нагреваемых элементов, возможность работы при низких температурах и т. д. И хотя по двум основным показателям (кпд и эффективность) КЛИС-АЭЭ заметно уступали (по оценкам) фотoluminesцентным источникам света, по ряду других важных показателей они их также превосходили. К таким показателям (характеристикам) относится, прежде всего, экологичность (отсутствие ртути), хотя можно назвать и ряд других, весьма важных в некоторых областях конкретных применений: широкий спектр реализуемых цветов, возможность миниатюризации, безинерционность (время включения около 10^{-8} сек) и др. [4].

Анализ появившихся в последние несколько лет публикаций и патентов (ссылки на основные из них содержатся в [5]) позволяет сделать ряд обобщений и выводов.

1. Налицо неоспоримый всплеск интереса к КЛИС-АЭЭ. Ясно, что прежде всего он связан с проблемой энергосбережения в осветительных уст-

новках, приобретшей за последние годы исключительное значение [6].

2. Подавляющее большинство опубликованных работ (если не все работы) по созданию действующих прототипов КЛИС-АЭЭ выполнено специалистами в области именно АЭЭ или близких к ней разделов вакуумной микроэлектроники [7]; специалисты в области люминофоров и, тем более, светотехники в широком смысле этого слова, к этим работам привлечены не были. Именно этим, на наш взгляд, объясняется то, что практически все описанные к настоящему времени в литературе высоковольтные (т. е. со световой отдачей не менее 20 лм/Вт) КЛИС-АЭЭ совершенно не учитывают (более того, зачастую — просто игнорируют) предельную допустимую электрическую нагрузку на люминофоры и, как следствие, существенно ее превышают. Разработка и создание КЛИС-АЭЭ осуществляются, фактически, "с другого конца": не от допустимой нагрузки на люминофор к необходимой плотности тока АЭЭ и т. д., а наоборот.

3. Чрезвычайно плодотворной представляется разработка и использование в КЛИС в качестве АЭ-катодов нового класса материалов — нанокластерных углеродных структур, в первую очередь нанотрубок [8, 9]. Помимо очевидных достоинств, связанных с ничтожным разбросом по высоте (10 нм), равномерностью токосъема по поверхности, высокой плотностью тока АЭЭ (до 1 А с 1 см²), возможностью в широких пределах варьировать геометрию катодов, высокой механической прочностью и, по-видимому, повышенной устойчивостью к ионной бомбардировке, эти материалы обладают (на это имеются серьезные указания [10], хотя и требующие еще детального изучения и доказательства) рекордно низкой работой выхода — на уровне 1 эВ.

Цель настоящей работы — развить и обосновать новый, существенно более оптимальный, по мнению авторов, алгоритм создания действительно эффективных, перспективных для дальнейшей промышленной реализации прототипов КЛИС-АЭЭ различного на-



Кохей Нарисада
(Kohei Narisada)
в 1953 г. окончил
университет
в Киото, Япония
(по специальности
электротехника).
В 1976 г. получил
степень доктора
технических наук.
Профессор

отделения психологии университета
Chukyo, Нагоя, Япония. В 1991—1999 гг.
Вице-Президент МКО. Почетный член
Японского национального комитета МКО

* 103907, Москва, Моховая ул. 11.

** 115304, Москва, Каширское ш. 31.

*** 10019, Саратов, Зеленая 38.

**** 117259, Москва, Б. Черемушкинская ул. 25.

***** 117312, Москва, Ленинский пр. 53.