

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

© 2010 г. С. М. Гвоздев***, канд. техн. наук; О. К. Куш*, доктор техн. наук; В. А. Сторожева*

* Всероссийский научно-исследовательский светотехнический институт, Москва

** Московский энергетический институт (технический университет), Москва

E-mail: gvozdevsm@yandex.ru, gvozdevsm@mpei.ru, kuschart@yandex.ru

Основными из важнейших направлений развития светотехники являются энергоэффективность систем освещения и создание комфортной световой среды для сохранения здоровья человека. Для широкого внедрения “интеллектуального” освещения необходима оценка видимости, которая может быть получена на основе многоканальной модели органа зрения, использующей его цветовые пространственно-частотные характеристики. В работе формулируется задача синтеза зеркальной поверхности по заданному уровню видимости, определяемому распределением яркости (освещенности) и спектральным составом излучения. Для проектирования светоптических систем, в частности зеркальных отражателей, разработана интегрированная концепция расчета световых приборов с учетом уровня видимости. Приведены методика и пример расчета с разрядным источником излучения.

Ключевые слова: энергоэффективность, световые приборы, световая среда, интеллектуальное освещение, видимость, цветовые пространственно-частотные характеристики, орган зрения, распределение яркости, цветность.

Коды OCIS: 330.1720, 330.1800, 330.3790, 330.4060, 330.6180, 3000.30290, 3000.30820.

Поступила в редакцию 25.03.2010.

В последнее время в различных областях светотехники ставят вопрос о скорейшем решении проблемы, связанной с энергосбережением и сохранением здоровья [1–4]. Энергосбережение на основе “интеллектуального” освещения является на сегодня важнейшей частью развития светотехники. Под интеллектуальным освещением мы понимаем системы, нацеленные на сохранение здоровья с использованием энергоэкономичных технологий.

Переход к экономии электроэнергии на основе интеллектуального освещения регулируемых осветительных установок при освещении улиц и архитектурных объектов, в промышленном освещении, освещении офисов, современных школ и дошкольных учреждений, в бытовом интерьере ставит задачу разработки общего критерия концептуального подхода как для систем управления, так и для проектирования систем освещения в целом.

Вопрос передачи и получения визуальной информации определяется качеством освещения, которое связано с психофизиологическими характеристиками нашего зрения [1, 2, 5, 6].

Пространственное распределение яркости и цветности формирует на сетчатке изображение, которое адаптирует человека на то или иное психофизиологическое состояние и во многом определяет незрительные процессы, проходящие в организме человека [1, 3, 5]. Именно поэтому энергосберегающие технологии следует рассматривать в связи с психофизиологическим состоянием человека. Расчет регулируемой осветительной установки, по нашему мнению, должен начинаться с задания видимости или уровня сложности зрительной задачи (обнаружение, опознавание) на освещаемом участке.

Современные нормы проектирования были сформированы на этапе становления и развития традиционных источников света, ограниченных по своим характеристикам, вследствие чего существующие стандарты по освещению строго регламентированы и не предусматривают возможности в полной мере задавать диапазоны регулирования. В качестве основы критерия для регулирования проектируемой осветительной установки по мощности может быть принята видимость, так как эта величина (поро-

говый контраст) лежала в основе создания стандартов. Так, например, для уличного освещения Международный комитет по освещению (МКО) рекомендовал использовать помимо уровня яркости на дорогах также уровень видимости [7].

Восприятие зрительной информации, оцениваемое видимостью, в значительной степени зависит от общего распределения яркости и цветности в поле зрения и определяет диапазоны изменения фотометрических параметров при регулировании источников излучения в осветительных установках. В связи с тем что сегодня для освещения используются в основном узкополосные или полосовые источники излучения (разрядные лампы и светодиоды) с резко выраженным спектральным составом, для определения видимости следует учитывать не только яркостную, но и цветовую пространственную характеристику контрастной чувствительности органа зрения (ОЗ).

Одним из традиционных подходов для оценки качества воспринимаемого изображения освещенного пространства в оптике и светотехнике является использование пространственно-частотной характеристики (ПЧХ), определяющей контрастную чувствительность на различных пространственных частотах [8–11]. Сегодня, ввиду различий в спектральном составе излучения источников света [12], необходимо учитывать цветоразличительную способность ОЗ. Спектральная чувствительность ОЗ человека регламентирована по рекомендации МКО для полей зрения 2° и 10° , что затрудняет использование ее для расчетов на различных пространственных частотах. Поэтому в основу решения задачи математического моделирования были положены экспериментальные результаты исследования трех цветовых ПЧХ ОЗ, описанные в работе [13]. Полученные среднестатистические характеристики дали возможность провести расчет пороговых характеристик ОЗ человека и использовать их для расчета регулирования светоцветовой среды [5].

Предлагаемая нами методика расчета видимости опирается на многоканальную модель ОЗ, основы которой заложены в работах [12, 14–17]. Статистическая независимость каналов детектирования была подтверждена экспериментальными исследованиями, где порог для суммы является вероятностной суммой порогов отдельных составляющих, и для пороговых условий наблюдения отдельный канал можно считать линейной системой [8–11].

Поскольку в данной статье идет речь об уличном освещении в условиях сумеречной адаптации, где уровень яркости для различных категорий дорог находится в пределах $0,5\text{--}2\text{ кд/м}^2$, то влиянием надпороговых явлений можно пренебречь и использование пороговой многоканальной модели органа зрения оправдано. Кроме того, рекомендации МКО по нормированию освещения дорог [7] включают параметр видимости, также определяемый в рамках пороговой модели, где видимость является отношением видимого и порогового контрастов.

Первым элементом используемой модели ОЗ является оптическая система глаза, характеризующаяся тремя передаточными функциями $\Pi_0(v_x, v_y)_K$, $\Pi_0(v_x, v_y)_Z$, $\Pi_0(v_x, v_y)_C$, где v_x и v_y – пространственные частоты во взаимно перпендикулярных направлениях. Эти функции определяют цветовые составляющие в физиологической колориметрической системе КЗС со спектральной чувствительностью рецепторов, определенной Н.Д. Ньюбергом и Е.Н. Юстовой [18]. Входным сигналом для оптической системы является пространственное распределение яркости и цветности в поле зрения, выходным – изображение на сетчатке. Чувствительный элемент представляет собой рецептивные поля, которые определяются перестраиваемой в соответствии с яркостной адаптацией мозаикой приемников (рецепторов). Рецептивные поля характеризуются соответствующими ПЧХ: $\Pi_{\text{ч}}(v_x, v_y)_K$, $\Pi_{\text{ч}}(v_x, v_y)_Z$, $\Pi_{\text{ч}}(v_x, v_y)_C$. Далее сигнал от рецептивных полей проходит через множество узкополосных фильтров, имеющих ПЧХ $\Pi_{\text{ф}}(v_x, v_y)_K$, $\Pi_{\text{ф}}(v_x, v_y)_Z$, $\Pi_{\text{ф}}(v_x, v_y)_C$.

Каждый узкополосный фильтр имеет большое количество нервных связей, самопроизвольная нервная активность которых определяет внутренние шумы каждого фильтра. Решение зрительной системы по критерию, определяемому пороговым уровнем отношения сигнал/шум (C/Π) $m_{\text{пор}} = C_{\text{пор}}/\Pi_{\text{пор}}$, использовалось для различных задач [8, 15–17]. Следует отметить, что пороговый уровень определяется вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги, а также зависит от весомости принятия данного решения. Под сигналом мы понимаем уровень нервной активности, приведенный ко входу ОЗ, т. е. уровень, созданный в результате всех преобразований энергии от объекта. Под шумом – уровень нервной активности, приведенный ко входу ОЗ, вызванный внутренними шумами системы.

Используемая в данной работе модель ОЗ включает в себя основные этапы переработки

зрительной информации с учетом уровня решения задачи (например обнаружение или опознавание).

Так как предположительно модель ОЗ представляет собой последовательность пространственных частотных фильтров, то распределение яркости объекта $L_0(x, y)$ необходимо представить в частотном виде в колориметрической системе координат КЗС, например для красной составляющей, следующим образом:

$$S_0(v_x, v_y)_K = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L_0(x, y)_K \times \exp[-i2\pi(v_x x + v_y y)] dx dy = \Delta L_K s_0(v_x, v_y)_K, \quad (1)$$

где $s_0(v_x, v_y)_K$ – относительное пространственное распределение красной составляющей яркости объекта, $\Delta L_K = L_{0,K} - L_{Ф,K}$ – амплитуда распределения яркости. В общем случае $S_0(v_x, v_y)_K$ представляет собой произведение спектров распределения освещенности $E(x, y)_K$, создаваемой осветительной установкой, и распределения коэффициента яркости $\beta(x, y)_K$ по поверхности объекта и фона.

Спектральную плотность мощности внутренних шумов для каждой цветовой составляющей обозначим в координатной системе КЗС как $G(v_x, v_y)_K, G(v_x, v_y)_З, G(v_x, v_y)_С$. Тогда ПЧХ фильтра, например красного –

$$\Pi_\Phi(v_x, v_y)_K = s^*(v_x, v_y)_K / G(v_x, v_y)_K, \quad (2)$$

где $s^*(v_x, v_y)_K$ – комплексно-сопряженная функция красной составляющей пространственного спектра входного сигнала на входе многоканального фильтра. Выражение (2) определено в области пространственных частот, ограниченных на низких частотах минимальной частотой поля зрения – $v_{кр}$ и предельной пространственной частотой на высоких частотах – $v_{гр}$.

Спектр выходного сигнала для многоканального фильтра определяется как

$$s(v_x, v_y)_K = s_0(v_x, v_y)_K \Pi_0(v_x, v_y)_K \Pi_\Phi(v_x, v_y)_K. \quad (3)$$

Выходное отношение С/Ш для этого случая при наличии оптимального фильтра можно представить в виде

$$m_K^2 = d_K / (4\pi^2) \int_{v_{кр}}^{v_{гр}} \int_{v_{кр}}^{v_{гр}} s(v_x, v_y)_K s^*(v_x, v_y)_K / G(v_x, v_y)_K dv_x dv_y, \quad (4)$$

где d_K – весовой коэффициент для красной цветовой составляющей спектра излучения.

Перепишем это выражение через спектр объекта, приведенный ко входу ОЗ

$$m_K^2 = d_K / (4\pi^2) \int_{v_{кр}}^{v_{гр}} \int_{v_{кр}}^{v_{гр}} |s_0(v_x, v_y)_K|^2 / \tilde{G}(v_x, v_y)_K dv_x dv_y, \quad (5)$$

где

$$\tilde{G}(v_x, v_y)_K = G(v_x, v_y)_K / \left| \Pi_0(v_x, v_y)_K \Pi_\Phi(v_x, v_y)_K \right|^2 -$$

– спектральная плотность мощности пространственного шума красной составляющей излучения, приведенного к входу ОЗ.

Как показано в работе [16], при наличии не-

равномерного пространственного распределения яркости, например красной составляющей фона, необходимо учитывать дополнительный шум, называемый “помехой”, – $R_\Phi(v_x, v_y)_K$, который, например для уличного освещения, учитывает влияние неравномерности яркости на дороге, блескости объектов (в том числе рекламных) в поле зрения и т. д., т. е.

$$m_K^2 = d_K / (4\pi^2) \int_{v_{кр}}^{v_{гр}} \int_{v_{кр}}^{v_{гр}} |s_0(v_x, v_y)_K|^2 / [\tilde{G}(v_x, v_y)_K + R_\Phi(v_x, v_y)_K] dv_x dv_y. \quad (6)$$

Если значение m , полученное на выходе многоканального фильтра, равно или превышает $m_{пор}$, то принимается решение о наличии объекта в поле зрения наблюдателя; при

$m < m_{пор}$ – решение о его отсутствии. Связь отношения $m_{пор}$ с вероятностью правильного обнаружения и ложной тревоги определена в работе [19].

Таким образом, можно выделить разность яркостей красной составляющей объекта и фона для расчета ее порогового значения как

$$\Delta L_{\text{пор}} = m_{\text{пор, К}} \left\{ d_K / (4\pi^2) \int_{v_{\text{кр}}}^{v_{\text{гр}}} \int_{v_{\text{кр}}}^{v_{\text{гр}}} s_0^2(v_x, v_y)_K / [\tilde{G}(v_x, v_y)_K + R_{\Phi}(v_x, v_y)_K] dv_x dv_y \right\}^{-1/2}. \quad (7)$$

Методика расчета пороговой разности яркости обнаружения или опознавания объекта сводится к определению порогового значения отношения С/Ш и спектральной плотности мощности цветковых пространственных шумов ОЗ. Экспериментальные данные, используемые нами, описаны в работе [13] как для условий сумеречной адаптации (0,5, 1, 1,6 и 2 кд/м² для уличного освещения), так и для яркостей дневной адаптации, которые показывают, что кривые цветовой контрастной чувствительности на различных пространственных частотах для разных цветов значительно отличаются. Для расчета были использованы экспериментальные данные исследований цветовой контрастной чувствительности для адаптации на 0,5 кд/м² (уличное освещение категории М4), где кривые цветовой контрастной чувствительности на различных пространственных частотах практически совпали, что можно считать естественным в условиях сумеречной адаптации.

В условиях уличного освещения расчет ПЧХ можно проводить для цветного изображения, характерного для разрядных источников излучения (ртутных, натриевых и металлогалогенных ламп) с координатами цветности, задаваемыми спектром излучения источника. Рассчитав пороговую яркость изображения, получим значение цветовой контрастной чувствительности на определенной пространственной частоте при средней яркости для наблюдаемого объекта на заданном яркостном и цветовом фоне.

Для проверки правильности разработанного подхода был проведен расчет исходя из данных для черно-белого изображения, полученных по характеристикам Блэкуэлла [20]. Хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных дало основание для возможности при-

менения описанной методики [4, 13], что и было использовано в решении данной задачи.

Расчет отношения С/Ш для высоких яркостей дневного зрения нужно проводить с использованием координат цветности спектра наблюдаемого объекта. Общее отношение С/Ш будет состоять из двух слагаемых: $m = m_{\text{КЗС}} + \Delta m_{\text{КЗС, цв}}$, где $m_{\text{КЗС}} = m_K + m_Z + m_C$ – яркостная составляющая, а $\Delta m_{\text{КЗС, цв}} = \Delta m_{\text{КЗ, цв}} + \Delta m_{\text{ЗС, цв}} + \Delta m_{\text{СК, цв}}$ – цветоразличительная составляющая (в соответствии с заданной координатной системой).

Видимость V традиционно рассчитывалась по отношению интегральных параметров реального фактического яркостного контраста $K_{\text{факт}} = \Delta L_{\text{факт}}/L_{\Phi}$ и порогового контраста $K_{\text{пор}} = \Delta L_{\text{пор}}/L_{\Phi}$, т. е. учитывалось только черно-белое восприятие объекта наблюдения [2]. Такой расчет вносит погрешность в определение яркости, которая, например для натриевых ламп, ДРЛ и СИД, достигает 20% и более только за счет линейчатого спектра излучения. При использовании нашей модели аналогом видимости становится отношение С/Ш, что не противоречит расчету, а уточняет определение $V(v) = m(v) = \Delta L_{\text{факт}}/\Delta L_{\text{пор}}$. В расчете видимости возможен учет как яркостной составляющей излучения, характеризующего спектральным составом осветительного устройства $m_{\text{КЗС}}$, так и цветоразличительной составляющей $\Delta m_{\text{КЗС, цв}}$. Оценка повышения чувствительности ОЗ за счет видимости освещаемых объектов с учетом цветоразличения создает возможности увеличения энергоэффективности в заданном диапазоне видимости. Общий вид зависимости цветоразличительной способности $\Delta C_{\text{пор}}$ с учетом разностных сигналов на трех составляющих цветности на различных пространственных частотах можно выразить как

$$\Delta C_{\text{пор}} = \Delta m_{\text{КЗС, цв}} \sum_{\Delta kj}^3 \left\{ \frac{d_{kj}}{4\pi^2} \int_{v_{\text{кр}}}^{v_{\text{гр}}} \int_{v_{\text{кр}}}^{v_{\text{гр}}} |\Delta s_{kj}(v_x, v_y)|^2 / [\tilde{G}_{\text{КЗС}}(v_x, v_y) + R_{\Phi, \text{КЗС}}(v_x, v_y)] dv_x dv_y \right\}^{-1/2}, \quad (8)$$

где d_{kj} – весовой коэффициент цветковых составляющих спектра излучения kj (например К и З), $\Delta s_{kj}(v_x, v_y) = s_k(v_x, v_y) - s_j(v_x, v_y)$ – спектральная разность на цветковых составляющих kj .

Создание заданного уровня видимости на объекте зависит от условий освещения, в том числе от выбора источников света и светопреобразующих поверхностей, определяющих распределе-

ние освещенности на объекте. Такими поверхностями, в частности, являются зеркальные или матированные поверхности, профиль которых позволяет получить требуемое распределение освещенности.

Таким образом, исходя из заданного уровня видимости, определяемого распределением яркости (освещенности) и спектрального состава излучения на рабочей плоскости (РП), формулируется задача синтеза зеркальной поверхности.

Под обратной задачей в теории световых приборов (СП) понимается определение формы зеркальной поверхности, обеспечивающей заранее заданное распределение фотометрической характеристики или удовлетворяющей выбранному критерию оптимальности, определенному в нашем случае диапазоном видимости. Для решения этой задачи необходимо задать положение источника света (ИС), определяющего спектральный состав излучения, и его кривую силы света (КСС).

В нашем случае обратная задача состоит в расчете такого светового прибора, который обеспечивает световое поле, соответствующее определенному распределению коэффициента яркости, и при этом отвечает требуемому уровню зрительной задачи (обнаружение, опознавание): $m = m_{\text{КЗС}} + \Delta m_{\text{КЗС, ЦВ}}$. Оценку необходимого значения видимости, с точки зрения уровня зрительной задачи, можно задать по обнаружению или опознаванию, что полностью определит параметры светового поля.

Это возможно реализовать двумя путями. Во-первых, поставленную задачу можно решить путем набора поля осветителей (источников света). Не теряя общности, можно положить, что КСС всех источников одинаковы. Поле осветителей представим прямоугольной матрицей размерности $p = 1...N$, $q = 1...M$. Упрощая задачу, будем считать, что осветители расположены равномерно, так что шаги постоянные $h_x(p) = h_{x0}$, $h_y(q) = h_{y0}$. Примем также оси КСС ортогональными для освещаемой РП, в то время как в [21] показано, что поле освещенности на РП может быть представлено двумерным рядом Фурье.

Представим распределение освещенности на РП выражением

$$E(x, y) = e(x, y) * t(x, y) = e(x, y) * \sum_{p=-N}^N \sum_{q=-M}^M \delta(x - ph_{x0}) \delta(y - qh_{y0}), \quad (9)$$

где $e(x, y)$ – распределение освещенности от одного источника, $t(x, y)$ – функция, описывающая распределение “центров масс” источников, а символ “*” обозначает операцию свертки.

Полагая $N \rightarrow \infty$, $M \rightarrow \infty$, переходим к преобразованию Фурье с помощью соответствий $E \leftrightarrow H$, $t \leftrightarrow T$, $e \leftrightarrow \varepsilon$:

$$H(v_x, v_y) = \varepsilon(v_x, v_y) T(v_x, v_y), \quad (10)$$

где

$$T(v_x, v_y) = 4\pi^2 / NM \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \delta\left(v_x - p \frac{2\pi}{h_{x0}}\right) \delta\left(v_y - q \frac{2\pi}{h_{y0}}\right).$$

Переход к обратному фурье-преобразованию даст искомое поле освещенности

$$E(x, y) = MN / 4\pi^4 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon(v_x, v_y) T(v_x, v_y) \times \exp[2\pi i(v_x x + v_y y)] dv_x dv_y. \quad (11)$$

Задавая определенный уровень неравномерности освещенности на РП, можно определить необходимые шаги между осветителями h_{x0} , h_{y0} , решая систему нелинейных уравнений. В более сложном случае можно выбирать точки нацеливания осей световых пучков. Тогда задачу создания, например равномерного освещения, можно свести к решению задачи нелинейной оптимизации.

Во-вторых, можно синтезировать светоптическую систему, считая положение источника фиксированным и начальные параметры системы (координаты начальной точки профиля отражателя, угол охвата и т. д.) известными. Тогда расчет такого отражателя сводится к решению задачи Коши системы из 2-х дифференциальных уравнений баланса потоков и кривой профиля отражателя. Обратная задача будет корректно поставленной, если ее решение существует, является единственным, устойчиво к малым изменениям исходных данных. Существование и единственность решений системы уравнений для зеркальных поверхностей с точечным источником доказаны в работах [22, 23]. Тип поверхности может быть выбран заранее,

если принять во внимание ограничения, наложенные на решение (например условие ограничения диаметра отражателя). В работе [24] приведены уравнения, описывающие возможные случаи расчета профильной кривой зеркального отражателя в зависимости от задания требуемой характеристики светораспределения, типа симметрии отражателя и типа ИС. Уравнения при заданных начальных условиях дают искомую кривую профиля отражателя в виде таблицы координат.

Полностью задача расчета светоптической системы может быть решена как итерационная, так как необходимо проводить проверку полученного результата и определять связь с технологическими особенностями оборудования, используемого при изготовлении светильника. Поэтому используются и прямые задачи расчета светораспределения – это расчет энергетических характеристик светового поля в ближней зоне (освещенности) и в дальней зоне (силы света) на основе геометрических и яркостных характеристик оптической системы (ОС).

Проектирование светоптической системы, в частности зеркальных отражателей, представлено в виде замкнутой системы, которая включает решение прямой и обратной задач, определяющее интегрированную концепцию расчета световых приборов. Этой цели отвечает программный пакет SHAPE [24], реализованный как приложение под Windows 95 и использующий стандартный интерфейс. Входной блок данных состоит из файла MAIN INPUT, файла с данными КСС источника, файла с координатами профиля (прямая задача) или с данными светораспределения системы (обратная задача). Выходной блок данных представлен файлом OUTPUT, в котором приводится полная информация о расчетной системе.

Исходные данные файла MAIN INPUT содержат параметры, которые разбиты на несколько разделов (классов).

1. Тип задачи, которая может быть определена как прямая или обратная; тип симметрии, где система может определяться как трансляционная или вращательная; тип светораспределения, где яркость, освещенность и сила света определяют учет (или нет) прямого света ИС.

2. Источник света, где КСС и тип ее интерполяции определяются линейным или кубическим сплайном; для расчета видимости также учитывается спектральный состав и распределение яркости.

3. Отражатель – в случае прямой задачи отражатель представляется в декартовом, полярном виде или в виде трассировочной функции; в случае обратной задачи (построения профиля) в качестве начальных параметров задаются полярные координаты начальной точки, конечный полярный угол, количество расчетных точек, направление прохода (по/против часовой стрелки).

4. Освещаемая область, определяющая распределение яркости для прямой задачи, задается граничными точками – координатами на рабочей площадке или углами; для обратной задачи представляется требуемая кривая светораспределения, задается тип интерполяции и границы освещаемой области. При нахождении кривой освещенности дополнительно указывается расстояние до рабочей площадки от светильника; для расчета видимости необходим массив значений коэффициента отражения по трем координатам цвета рабочей площадки.

5. Схема хода лучей может быть задана эллиптической или гиперболической и определяется направлением обхода профиля и расположением границ освещаемой области.

При проектировании по SHAPE (для отражателей с трансляционной симметрией) может быть использовано произвольное количество источников света (для прямой задачи); положение источника света может быть задано произвольно, что позволяет учесть расфокусировку системы.

Для примера приводим расчет осветительного устройства по разработанной методике с излучателем на металлогалогенной лампе (МГЛ), применяемой для целей уличного освещения, с учетом особенности полосового спектра лампы. Особенности полосового спектра источника света определялись для МГЛ типа HCL T 100/830WDL 9500Lm и учитывались непосредственно при расчете координат цветности излучения.

Основные этапы расчета:

1. Для рекомендованной МКО сцены наблюдения (дороги) задавался уровень сложности зрительной работы – обнаружение, в соответствии с [7] для класса освещения М4 и яркости на дороге $L = 0,5$ кд/м². Формировалась световая среда с учетом средней яркости и фотометрических характеристик источника излучения. По рекомендациям МКО [7] определялась предельная пространственная частота тест-объекта с коэффициентом отражения 20%. Угловой размер составил $0,124^\circ$, а пространственная частота – $\nu = 8,05$ цикл/град.

2. Проводился расчет координат цветности излучателя. Хотя в качестве основной колориметрической системы в расчетах была использована система КЗС, основанная на физиологических данных на уровне рецепторов, в расчетах также допускается переход к психофизической колориметрической системе КЗС [18]. Таким образом, координаты цветности в системе КЗС составили: $k = 0,3588$, $z = 0,3488$, $c = 0,2923$.

3. Рассчитывался шум [17], приведенный ко входу ОЗ, на каждой цветовой составляющей по данным рис. 1, определяемый выражением

$$\tilde{G}(\nu)_{\text{КЗС}} = L_{\text{пор, КЗС}}^2 / (\pi^2 \nu^2).$$

4. По формулам (6) и (8) было рассчитано отношение С/Ш (видимости) $m_{\text{КЗС}} + \Delta m_{\text{КЗС, цв}} = 6,4$, что превышает заданное значение для класса освещения М4 [7]. Расчет показал возможность понижения средней яркости до значения $L = 0,4$ кд/м², уровень видимости при пересчете составил 5,6.

5. Для расчета светооптической системы определялись габаритные и технологические параметры отражателя – высота профиля, угол раскрытия, отражающий материал и т. д.

6. По заданному распределению освещенности проводился расчет светооптической системы с трансляционной симметрией. Профиль отражателя рассчитывался в двух перпендикулярных сечениях. Отражатель и источник располагались над центром прямоугольной области, ограничивающей освещаемый объект. Проводился синтез рассчитанных сечений для получения объемной формы отражателя.

7. Затем рассчитывалось распределение освещенности от полученных отражателей с учетом расфокусировки (положение источника) и для различного числа промежуточных сече-

ний (фацет). В процессе итерационной задачи решение уточнялось при сопоставлении результатов по критериям соответствия нормам и технологичности изготовления и эксплуатации, что позволило получить оптимальный вариант светооптической системы (рис. 2) для осуществления поставленной задачи освещения объекта. Полученное после оптимизации распределение освещенности показано на рис. 3.

Проведенный по разработанной методике расчет показывает, что для поставленных условий освещения величина видимости оказывается соответствующей более высокому классу освещения по [7]. Такое расхождение связано с тем, что нормы не учитывают цветовые свойства световой среды, которые улучшают видимость объектов. Тем не менее, получившийся запас в уровне видимости (16%) может быть использован в целях экономии электроэнергии, например, путем регулирования средней яркости освещаемого объекта до приемлемого уровня видимости.

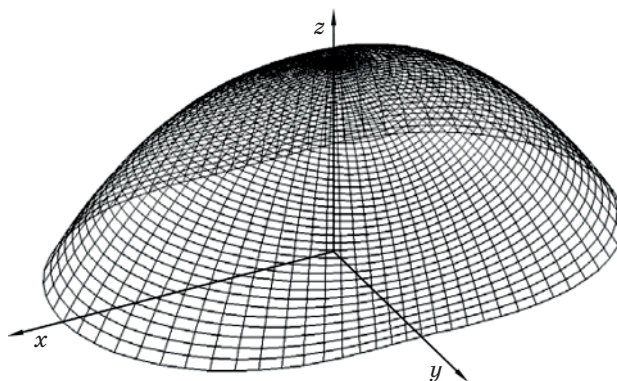


Рис. 2. Трехмерная расчетная модель отражателя.

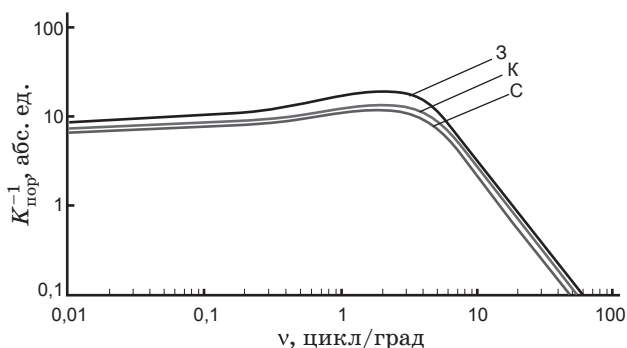


Рис. 1. Зависимость цветовой контрастной чувствительности $K_{\text{пор}}^{-1}$ от пространственной частоты ν в колориметрической системе КЗС для яркости адаптации $0,5$ кд/м²: К – красный, З – зеленый, С – синий.

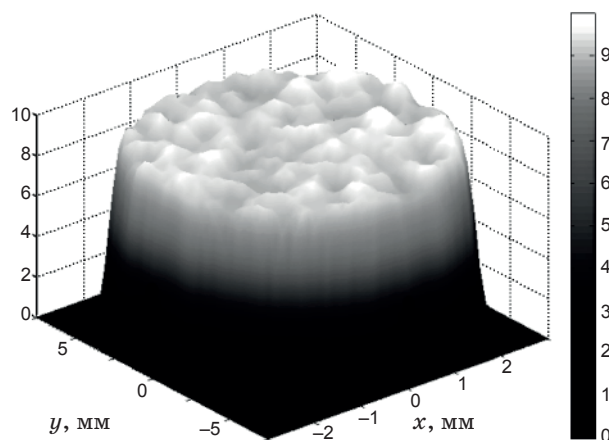


Рис. 3. Результирующее распределение освещенности (в люксах) на рабочей плоскости.

Общая идея данной статьи состоит в разработке алгоритма расчета светооптической системы по критерию видимости для интеллектуальных систем уличного освещения. Вместе с тем стоит указать, что энергосберегающие источники используют электронные пускорегулирующие устройства, работающие в широком спектре временных частот, влияющих на психофизиологическое состояние человека. Влияние нестационарных процессов на видимость при наружном освещении может быть рассмотрено в следующих наших работах, где пространственно-временные характеристики зрения должны учитываться, как важнейшие параметры при применении интеллектуального освещения.

На этапе разработки алгоритма расчета светооптической системы по критерию видимости определены пути решения итерационной задачи для обеспечения энергоэффективного управления осветительными системами как в процессе их эксплуатации, так и в процессе проектирования. Программа регулирования параметров осветительной установки, основанная на разработанной нами методике, позволяет создавать управляемые системы интеллектуального освещения нового поколения. Данные системы могут быть адаптированы на этапе проектирования под особенности используемого источника излучения, позволяют учитывать психофизиологические возможности человека и могут быть использованы для проектирования систем комфортного и оздоровительного энергоэффективного освещения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение. М.: Мир, 1990. 240 с.
2. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники. Ч. 2. М.: Энергия, 1976. 432 с.
3. Брейнард Г.К., Гликман Г.Л. Биологическое влияние света на здоровье и поведение человека // Светотехника. 2004. № 7. С. 4–8.
4. Гвоздев С.М. Интеллектуальное освещение // Коммунальный комплекс России. 2009. № 5 (59). С. 64–69.
5. Богатова Р.И., Сальницкий В.П., Гвоздев С.М., Агуреев А.Н., Беляев Р.И., Кутина И.В., Ливенцова А.А., Садовникова Н.Д. Влияние пространственно-частотных характеристик органа зрения на психологическое состояние человека и его работоспособность // Аэрокосмич. и экологич. медицина. 2009. № 3. С. 24–28.
6. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. М.: Энергоатомиздат, 1995. 528 с.

7. Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic. Technical report, CIE 115–1995. 15 p.
8. Старк Г. Применение методов фурье-оптики. М.: Радио и связь, 1988. 536 с.
9. Enroth-Cugell C. & Robson J.G. The Contrast Sensitivity of Retinal Ganglion Cells of the Cat // J. Physiol. 1966. V. 187. P. 517–552.
10. Campbell F.M., Robson J.G. Application of Fourier analysis to the visibility of gratings // J. Physiol. 1968. V. 197. P. 551–566.
11. Филд Д. Согласованные фильтры, вейвлеты и статистика натуральных сцен // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 9. С. 25–36.
12. Бертулис А.В., Глезер В.Д. Пространственное цветовое зрение. Л.: Наука, 1990. 144 с.
13. Гвоздев С.М., Садовникова Н.Д. Расчет пороговых характеристик восприятия при визуализации цветных изображений наблюдаемых объектов // Труды VIII Междунар. научно-технич. конфер. “Оптические методы исследования потоков”. М.: изд. МЭИ, 2007. С. 264–267.
14. Красильников Н.Н., Шелепин Ю.Е., Красильникова О.И. Математическая модель цветовой контрастности зрительной системы человека // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 5. С. 38–44.
15. Васильковский А.А. Пространственно-частотные функции цветовых каналов органа зрения // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 9. С. 23–28.
16. Мартынов В.Н., Шкурский Б.И. Модель зрительного анализатора как оптимальной системы обнаружения // ОМП. 1980. № 8. С. 1–4.
17. Гвоздев С.М. Методика расчета и исследование видимости при использовании активно-импульсных систем // Автореф. канд. дис. М.: изд. МЭИ, 1983. 20 с.
18. Юстова Е.Н. Цветовые измерения (колориметрия). СПб.: СПбГУ, 2000. 397 с.
19. Титков Б.В. О флуктуационном пороге контрастной чувствительности приемников света // Светотехника. 1966. № 1. С. 12–15.
20. Blackwell H.R. Contrast threshold of the human eye // J. Opt. Soc. Amer. 1946. № 10. P. 624–643.
21. Куш О.К., Мельников Г.А., Савенков В.И., Сафронов Н.Н. Построение поля освещенности от ряда светильников с помощью передаточной функции // Тематич. сб. трудов МЭИ “Физическая оптика и светотехника”. 1981. В. 519. С. 116–122.
22. Болдырев Н.Г. О расчете несимметричных зеркальных колпаков // Светотехника. 1932. № 7. С. 7–8.
23. Комиссаров В.Д. Основы расчета зеркальных и призматических отражательных арматур // Труды ВЭИ. 1941. В. 43. С. 5–59.
24. Куш О.К. Оптический расчет световых и облучательных приборов на ЭВМ. М.: Энергоатомиздат, 1991. 152 с.