

# Оценка качества освещения на основе пространственно-углового распределения яркости

В.П. БУДАК, В.С. ЖЕЛТОВ, Т.В. МЕШКОВА, Р.Ш. НОТФУЛЛИН

НИУ «МЭИ», г. Москва  
E-mail: budakvp@gmail.com

## Аннотация

В статье рассматривается новый подход к формулированию критерия качества освещения на основе анализа пространственно-углового распределения яркости и свойств зрения человека. В рамках работы создана исследовательская установка для определения зон комфорта и дискомфорта, неразрывно связанных с качеством освещения. Показана возможность компьютерного моделирования пространственно-углового распределения яркости на основе локальных оценок метода Монте-Карло, что позволяет в перспективе перейти от моделирования на заданное распределение освещённости к моделированию на заданное качество.

**Ключевые слова:** локальные оценки метода Монте-Карло, пространственно-угловое распределение яркости, дискомфорт, критерий качества освещения.

## 1. Введение

Развитие вычислительной техники и методов математического моделирования совершило подлинную революцию в проектировании осветительных установок (ОУ). В конце прошлого и начале текущего века удалось перейти от изнуряющих инженерных расчётов к компьютерному моделированию ОУ. Это позволило не только проектировать на заданные количественные нормируемые показатели, но и увидеть «фотореалистичную» картину ещё не существующей установки. И если сегодня задачу проектирования ОУ на заданные количественные характеристики можно считать в целом решённой, то задача проектирования на заданные качественные характеристики только ставится перед светотехническим сообществом. Мало

того, сформулированные на сегодняшний день качественные характеристики обладают существенными недостатками. Фактически, в реальной инженерной практике, вопрос качественных показателей выражен лишь в расчёте объединённого показателя дискомфорта *UGR*. Если на заре развития методов и программных средств моделирования ОУ такая ситуация была закономерна, то с появлением новых методов [1] моделирования уравнения глобального освещения (УГО) [2] появляется принципиально новая возможность не просто расчёта распределения освещённости в диффузном приближении, а получения пространственно-углового распределения яркости. Это позволяет вновь поставить вопрос о показателях качества освещения и проектировании ОУ на заданные качественные показатели.

## 2. Моделирование пространственно-углового распределения яркости локальными оценками метода Монте-Карло

Современная светотехническая практика и нормируемые характеристики исходят из возможности моделирования освещённости с учётом многократных отражений и возможности моделирования яркости только для прямого света без учёта отражений. Исходя из этого, только в наружном освещении – архитектурном и дорожном – нормируется истинная воспринимаемая глазом человека характеристика – яркость. Отметим, что общепринятые в проектировании ОУ программы *DIALux* и *Relux* моделируют распределение освещённости в диффузном приближении. При таком подходе методом конечных элементов моделируется уравнение излучательности [9], которое является следствием УГО [2] в диффузном приближении.

УГО представляет собой интегральное уравнение второго рода

$$L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{n}}) = L_0(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{n}}) + \frac{1}{\pi} \int L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{n}}') \sigma(\mathbf{r}; \hat{\mathbf{n}}, \hat{\mathbf{n}}') |(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{n}}')| d\hat{\mathbf{n}}', \quad (1)$$

где  $L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{n}})$  – яркость в точке  $\mathbf{r}$  по направлению  $\hat{\mathbf{n}}$ ,  $\sigma(\mathbf{r}; \hat{\mathbf{n}}, \hat{\mathbf{n}}')$  – двунаправленная функция отражения (отражения или пропускания),  $L_0$  – прямая компонента яркости, непосредственно от источников,  $\hat{\mathbf{N}}$  – нормаль в точке  $\mathbf{r}$  к элементу поверхности сцены.

Отметим, что в настоящее время появился новый программный продукт *DIALux Evo*, в основе которого лежит моделирование УГО на основе фотонных карт [10], что позволяет моделировать пространственно-угловое распределение яркости. Однако *DIALux Evo* на данный момент ещё не нашёл своего места в инженерной практике.



Рис. 1. Пример визуализации пространственно-углового распределения яркости локальными оценками метода Монте-Карло для эталонной сцены *Cornell Boxes*

В рамках этой работы предлагается применить локальные оценки метода Монте-Карло к решению УГО. Метод локальных оценок берёт своё начало в атомной физике [11] и получил дальнейшее развитие в оптике атмосферы и океана [12]. УГО может быть записано в виде интеграла по пространству и разложено в ряд Неймана, каждый член которого представляет собой определённый многократный интеграл по пространству, который можно приближённо представить в виде квадратуры по случайным узлам – метод Монте-Карло. После ряда преобразований полученное разложение может быть записано в виде [1]:

$$L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) = L_0(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{\pi} \frac{L_0(\mathbf{r}_{1i}, \hat{\mathbf{l}}_{1i}) \sigma(\mathbf{r}; \hat{\mathbf{l}}_{1i}, \hat{\mathbf{l}}) G(\mathbf{r}_1, \mathbf{r})}{p_1(\mathbf{r}_{1i}, \hat{\mathbf{l}}_{1i}) p_2(\mathbf{r}_{1i}, \hat{\mathbf{l}}_{1i} \rightarrow \mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}})} + \frac{1}{\pi^2} \frac{L_0(\mathbf{r}_{1i}, \hat{\mathbf{l}}_{1i}) \sigma(\mathbf{r}_{2i}; \hat{\mathbf{l}}_{1i}, \hat{\mathbf{l}}_{2i}) G(\mathbf{r}_{1i}, \mathbf{r}_{2i})}{p_1(\mathbf{r}_{1i}, \hat{\mathbf{l}}_{1i}) p_2(\mathbf{r}_{1i}, \hat{\mathbf{l}}_{1i} \rightarrow \mathbf{r}_{2i}, \hat{\mathbf{l}}_{2i})} \times \frac{\sigma(\mathbf{r}; \hat{\mathbf{l}}_{2i}, \hat{\mathbf{l}}) G(\mathbf{r}_{2i}, \mathbf{r})}{p_2(\mathbf{r}_{2i}, \hat{\mathbf{l}}_{2i} \rightarrow \mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}})} + \dots \right), \quad (2)$$

где  $p_1(\mathbf{r}_{1i}, \hat{\mathbf{l}}_{1i})$ ,  $p_2(\mathbf{r}_{1i}, \hat{\mathbf{l}}_{1i} \rightarrow \mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}})$  – начальная и переходная плотности вероятности, определяющие положение случайных узлов [12].

Поскольку  $p_2(\mathbf{r}_{1i}, \hat{\mathbf{l}}_{1i} \rightarrow \mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}})$  определяется только двумя последовательными случайными узлами, то выражение может быть интерпретировано как марковская цепь. В результате построения марковской цепи можно на каждом её акте оценивать ядро перехода для исследуемых точек  $\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}$ . Накапливая статистику, получим непосредственно яркость в заданных точках по заданным направлениям [1]. Такая оценка может быть названа локальной оценкой по аналогии с оценками в атмосферной оптике [12].

Сформулируем алгоритм локальной оценки. На первом этапе в сцене фиксируют исследуемые точки и направления  $\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}$ . После чего случайным образом определяют источник света и произвольное направление выхода луча из источника. Наиболее эффективной будет выборка источника с вероятностью, пропорциональной его световому потоку, и выбор направления в соответствии с распределением яркости источника или кривой силы света. После этого полученный луч трассируется до пересечения с объектом. Далее для каждой из исследуемых точек вычисляется ядро УГО и начинает накапливаться статистика. Накопив статистику, усреднив и нормировав, получаем непосредственно яркость в заданных точках по заданным направлениям. При этом в данном методе может быть использована диффузно-направленная модель отражения, например, модель Фонга [13].

Впервые алгоритм, сходный локальным оценкам, был сформулирован в [14] применительно к визуализации в компьютерной графике в феноменологическом подходе и получил название *Instant Radiosity*. Отсутствие строгого математического обоснования алгоритма для компьютерной графики в большинстве случаев не является недостатком, так как основная цель при этом – «фотореалистичная» визуализация, а не получение точных значений яркости. В светотехнике же ситуация иная: тут важно иметь несмещённые значения яркости для её анализа. Предло-

женный в [14] алгоритм, восходит к [11], а его математическое обоснование даётся в [1]. На рис. 1 приведён пример расчёта распределения яркости в эталонной сцене *Cornell Boxes*. Таким образом, локальные оценки позволяют моделировать непосредственно яркость в заданной точке и в заданном направлении.

Зная распределения яркости в каждой точке сцены освещения, можно вычислить любую характеристику светового поля. Наибольший интерес представляет расчёт некоторой величины, характеризующей качество освещения по заданному уровню зрительной работы и соответствующей заложенным идеям светового дизайна освещения сцены. Формулировка такого критерия позволила бы автоматизировать оптимизацию расчёта осветительной установки. Причём лучше, если программа подскажет набор оптимальных схем освещения, оставляя окончательный выбор за дизайнером световой среды в сцене.

## 2. Критерий качества освещения

Результаты наших исследований позволяют выделить следующие факторы, влияющие на зрительный дискомфорт, а соответственно, и на качество освещения в целом:

- пространственно-угловое распределение яркости;
- зрительная адаптация;
- спектральный состав излучения источников света;
- время экспозиции.

Из экспериментов следует, что наибольший вклад вносят первые два фактора, тогда как влияние спектрального состава излучения источников света и времени экспозиции требует отдельных исследований.

В современной редакции словаря Международной комиссии по освещению нет определения качества освещения, поэтому сформулируем его самостоятельно: *освещение можно считать качественным, если оно способствует повышению зрительной работоспособности человека и не препятствует в решении задач, поставленных в рамках той или иной сцены освещения*.

На сегодняшний день нормируются количественные характеристики освещения, как правило, в виде одного числа. В идеальной ситуации и качественные характеристики должны нормироваться в виде отдельных чисел. В рамках этой работы, была поставлена цель сформулировать оценку качества освещения в виде одного интегрального значения для произвольной сцены освещения с известным распределением яркости для каждой точки пространства в каждом направлении.

На дискомфорт влияет отношение яркости источника к яркости фона [6] – контраст. При этом существует некоторый порог контраста, при превышении которого возникает ощущение дискомфорта. На наш взгляд, отношение контраста к пороговому и может служить критерием качества освещения. В случае непрерывного пространственно-углового распределения яркости по сцене освещения естественным обобщением контраста является отношение градиента распределения яркости по полю наблюдения к средней по полю яркости. С увеличением значения градиента граница между блёским источником и фоном будет становиться более очерченной, а качество освещения, соответственно, уменьшаться. Далее можно предположить, что направление изменения яркости не влияет на качество освещения, а потому включаем в расчёт абсо-

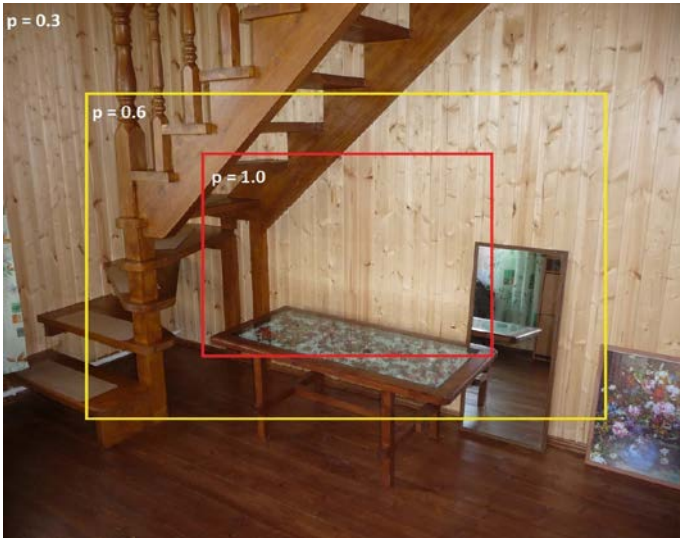


Рис. 2. Пример задания весового коэффициента  $p$  для разных полей зрения

лутное значение градиента. Выбрав точку пространства внутри сцены (помещения) и направление наблюдения, можно определить обобщённый контраст в точке сцены:

$$K(x, y) = \frac{|\text{grad}L(x, y)|}{\bar{L}}, \quad (3)$$

$$\bar{L} = \frac{1}{A} \int_{(A)} L(x, y) p(x, y) dx dy, \quad A = \int_{(A)} dx dy,$$

где  $x, y$  – координаты точки на проекции сцены,  $L$  – яркость в данной точке в направлении наблюдения,  $\bar{L}$  – средняя по полю зрения яркость,  $p(x, y)$  – некоторая весовая функция, учитывающая различный вклад в реакцию глаз точек, расположенных в центре поля зрения и на периферии, так как плотность колбочек наибольшая у зрительной оси [7].

Координаты  $x, y$  в синтезированном изображении однозначно связаны с направлением визирования  $\hat{\mathbf{i}}$  для пространственно-углового распределения яркости  $L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{i}})$  из (1) при задании точки визирования сцены или, что аналогично, видовой точки в светодизайне, и фокуса камеры визуализации сцены. В этом смысле  $A$  можно трактовать как площадь кадра визуализации или как телесный угол поля зрения камеры.

Распределение колбочек по сетчатке можно считать пропорциональным  $1/\theta^2$ , где  $\theta$  – угол визирования [8]. Соответственно, вводимая функция  $p$  или должна быть пропорциональна этой величине, или может быть задана таблично, например, как показано на рис. 2.

В качестве критерия качества освещения  $Q$  возьмём средневзвешенный по полю обобщённый контраст  $K(x, y)$  (уравнение (3)):

$$Q = \frac{1}{AK_{\text{пор}}} \int K(x, y) p(x, y) dx dy, \quad (4)$$

где  $K_{\text{пор}}$  – пороговое значение контраста.

Отметим, что в большинстве практических светотехнических задач нас интересует освещение не всей сцены,

а только некоторых её частей. Так, во внутреннем освещении нормируется освещённость на рабочих поверхностях, а не в проходах.

При освещении спортивной площадки в первую очередь стоит вопрос освещения игрового поля. Более того, часто проектировщик формирует зоны акцентирования освещения для создания некоторого светового ритма в освещении сцены. Таким образом, необходимо ввести ещё один дополнительный весовой коэффициент  $h$  ( $0 \leq h(x, y) \leq 1$ ), учитывающий светотехническую задачу, причём он равен 1 в рабочей зоне и 0 для точек, несущественных для качества освещения. Выбор значений коэффициента  $h(x, y)$  соответствует алгоритмам нечёткой логики [15]. Пример задания коэффициента  $h(x, y)$  схематически показан на рис. 3.

Теперь выражение (4) для расчёта критерия качества примет вид:

$$Q = \frac{1}{AK_{\text{пор}}} \int K(x, y) p(x, y) h(x, y) dx dy. \quad (5)$$

Полученное выражение можно использовать для осуществляемой с помощью программных средств оценки качества освещения одним числом в случае, если известно распределение яркости для всех точек сцены в любом направлении. Отметим, что критерий, несомненно, нуждается в экспериментальной проверке, однако, на наш взгляд, нет необходимости его сверхточного определения: во-первых, разброс зрительного восприятия достигает десятков процентов и во-вторых, этот критерий нужен только для оптимизации выбора расчётной схемы освещения, оставляя окончательное решение за светодизайнером.

### 3. Экспериментальное определение дискомфортной яркости на границе комфорт-дискомфорт

Качественные показатели освещения неразрывно связаны с наблюдателем, определяющим ощущение комфорта или дискомфорта. Причём оценка со стороны наблюдателя является субъективной и может варьироваться от наблюдателя к наблюдателю в очень широких пределах. Под дискомфортом принято понимать неприятные ощущения при неравномерном распределении или высоком уровне яркости в поле зрения  $L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{i}})$ . Явление блёскости затрудняет считывание показаний приборов



Рис. 3. Пример определения весового коэффициента  $h$ , учитывающего светотехническую задачу



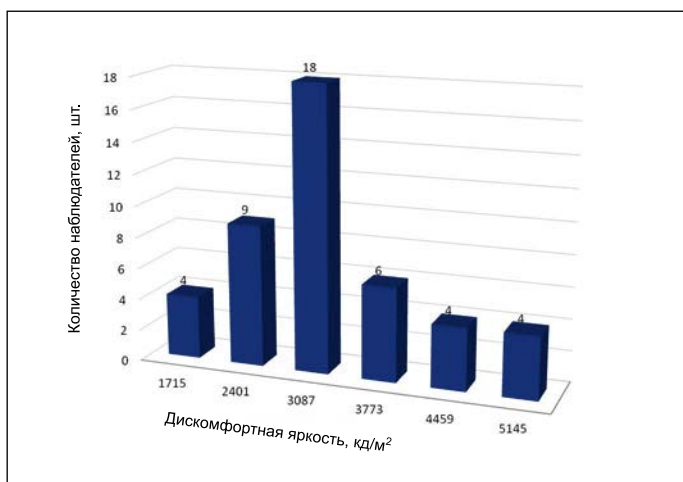


Рис. 4. Распределение значений яркости ГКД («standard BCD brightness»)

и индикаторов, ухудшает видимость наблюдаемых предметов, вызывает преждевременное утомление зрительного анализатора. В этом смысле введенный критерий  $Q$  позволяет оценивать дискомфорт освещения в сцене с фиксированной видовой точки, но для его определения необходимо исследование пороговых характеристик глаза  $K_{пор}$ .

В рамках этой работы, на кафедре «Светотехники» НИУ «МЭИ» было проведено исследование по оценке ощущения дискомфорта от блёского источника в поле зрения наблюдателя. За основу эксперимента был взят эксперимент Лекиша и Гута [3] 1949 года по нахождению граничного значения дискомфортной блёскости, в ходе которого были выявлены зависимости этого параметра от основных факторов.

В эксперименте Лекиша и Гута расширенное поле зрения равномерной яркости было смоделировано с помощью двух третей 80-дюймовой (2м) фотометрической сферы с лампой, расположенной недалеко от центра, чтобы обеспечить равномерное поле освещённости. Источники света были расположены за круглыми отверстиями в поверхности сферы, предусмотренными для источников яркого света. Наблюдатель помещался в центре сферы на стуле, так что его голова находилась точно в центре сферы.

Оценка ощущения блёскости производилась при кратковременном появлении источника в поле зрения наблюдателя при условии равномерного распределения яркости



Рис. 5. Экспериментальная установка.

фона. При этом яркость фона принималась равной яркости адаптации. Эксперимент включал в себя циклы из трёх односекундных периодов «включено» с равными 1 с промежутками между ними с последующей пятисекундной паузой между циклами. Наблюдатели сами определяли количество циклов эксперимента, достаточное для оценки яркости в поле зрения на границе комфортной и дискомфортной блёскости (ГКД) (*Brightness in the Visual Field at Borderline Between Comfort and Discomfort (BCD)*). Всего в эксперименте участвовало пятьдесят наблюдателей, которые регулировали исходную яркость для определения собственного критерия ГКД.

Для определения зависимости граничного значения дискомфортной блёскости от основных факторов Лекишем и Гутом была проведена ещё одна серия экспериментов. В этой серии варьировались значения яркости фона (1, 10 и 100 фут-ламбертов (1 фут-ламберт = 10,764 лк)), угловой размер источника света (в диапазоне от 0,0001 до 0,126 ср), и положение источника света (в диапазоне от 0 до 100° относительно линии зрения по вертикали, горизонтали и диагонали). В этих экспериментах участвовали только десять наблюдателей. Также была исследована зависимость яркости ГКД от размера, расположения и количества блёских источников в поле зрения наблюдателя.

По результатам эксперимента Лекиша и Гута, значение яркости ГКД при яркости адаптации 31,4 кд/м² и диаметре источника света 3,76 см равно 3103 кд/м². Источник света располагался на линии зрения наблюдателя на расстоянии 1 м от наблюдателя. На рис. 4 приведено распределение значений яркости ГКД в зависимости от количества наблюдателей.

В современном мире энергосбережения и энергоэффективности основными источниками света становятся светодиоды и осветительные приборы на их основе. Освещение светодиодами (СД) применяется повсеместно, и дискомфорт от блёских источников света малого размера является актуальной проблемой [4]. Кроме того, малый размер и различные оптические характеристики СД и СД матриц позволяют смоделировать блёский источник света любых размера и формы, имитируя блики на рабочем столе или слепящие фары встречного автомобиля.

Для современного исследования яркости ГКД на кафедре светотехники МЭИ была создана экспериментальная установка. Основой для установки послужил металлический лист, покрашенный белой порошковой краской, на котором смонтированы платы с различной конфигурацией расположения СД. В центре листа расположена круглая плата с тремя СД мощностью 0,3 Вт, вокруг которой смонтированы прямоугольные платы, имитирующие блёский источник света большего размера. Цветовая температура установленных СД равна 5000 К. Включение плат в различных режимах осуществляется с блока управления, с помощью которого можно регулировать световые потоки источников света. Экспериментальная установка расположена на высоте 0,75 м от пола так, чтобы центральная плата была на уровне глаз наблюдателя. Экспериментальная установка показана на рис. 5.

По мере составления и отработки экспериментальной методики была выявлена необходимость установки матовой ткани для большего рассеяния света. Для изменения цветности в сторону более низкой цветовой температуры был установлен фильтр *LEE FILTERS204 FULL C.T.*

*ORANGE*, а для моделирования одного источника света диаметром 3,76 см был применён диффузионный свето-фильтр. Общее освещение, а соответственно, и яркость фона в помещении, создаётся с помощью 6 регулируемых встроенных светильников с СД. Управление установкой осуществляется с помощью тумблеров, для каждого источника света (составного или единичного) предусмотрен свой переключатель. Калибровка экспериментальной установки была произведена с помощью яркомера *Konika Minolta LS-110*.

За основу шкалы дискомфорта были приняты пять основных критериев Хопкинсона [5]: заметно, приемлемо, дискомфортно, неудобно и невыносимо. В процессе обучения методике определения ощущений было выявлено, что интерпретация для испытуемых неочевидна, и некоторые критерии определяются как диапазон значений яркости. Поэтому после перебора различных шкал, подбора оптимальных общепонятных определений каждого из критериев в совокупности с проведением зрительной работы во время эксперимента была выбрана следующая шкала дискомфорта: едва заметно; безразлично; приемлемо; дискомфортно; неудобно; невыносимо.

Яркость блёского источника регулировалась сначала экспериментатором, затем испытуемым с помощью встроенного светорегулятора. Результаты эксперимента при регулировании яркости самими наблюдателями имели меньший разброс значений по сравнению с тем, когда регулировка осуществлялась экспериментатором.

В силу отсутствия возможности регулирования общего освещения в классной комнате от 0 до 100 %, при проведении эксперимента яркость фона (адаптации) составляла 75 кд/м<sup>2</sup>. Наблюдатель располагался на стуле перед установкой на расстоянии 1 м от неё. Всего было получено 63 ответа для каждого из критериев. По результатам экспериментов было получено значение дискомфорта яркости 3350 кд/м<sup>2</sup>, отличающееся от значения, полученного Лекишем и Гутом на 300 кд/м<sup>2</sup> в большую сторону.

Такая разница в значениях яркости ГКД получилась ввиду технических ограничений, из-за которых невозможно полностью воспроизвести условия эксперимента Лекиша и Гута в экспериментальном окружении существующей установки. Основными причинами расхождения результатов явились:

- яркость фона в установке МЭИ была почти в два раза выше заявленной в эксперименте Лекиша и Гута, 75 и 34 кд/м<sup>2</sup> соответственно;
- предполагаемая цветовая температура тепловых источников света, используемых в эксперименте Лекиша и Гута (2700–3000 К), значительно отличается от цветовой температуры СД, используемых в установке МЭИ (5000 К);
- в установке Лекиша и Гута использовался один тестовый источник света, а в установке МЭИ источники света разных размеров формируются с помощью различной компоновки единичных СД.

На основании проведённого эксперимента, нам удалось установить, что на значение яркости ГКД оказывает влияние цветность излучения. Также яркость ГКД зависит от количества и формы блёских источников света в поле зрения наблюдателя. В первичном опыте три СД сливались в один (диаметр источника света = 3,76 см) лишь при высоких значениях яркости, соответствующих

болезненным («невыносимым») ощущениям, и при определении яркости ГКД могли не восприниматься глазом как источник, эквивалентный одному источнику света большего диаметра.

После проведения модификаций экспериментальной установки в соответствии результатами выполненных исследований, все зависимости ГКД качественно совпали с результатами Лекиша и Гута, что доказывает верность разработанной методики. Численного совпадения, на наш взгляд, добиться невозможно: как следует из описания результатов измерений, для этого надо полностью повторить их установку, но в этом и нет необходимости. Они проводили все измерения с лампой накаливания, а у нас были СД, что более актуально для настоящего времени.

## Заключение

В этой работе предложен новый комплексный подход к исследованию и определению нового критерия качества освещения, основанного на пространственно-угловом распределении яркости. Переход от проектирования на заданное распределение освещённости к проектированию на заданное качество — это на сегодняшний день уже явная тенденция. Подобный переход стал возможным благодаря развитию вычислительной техники и математических методов моделирования УГО. При этом формулирование нового критерия качества немыслимо без экспериментальных исследований из-за отсутствия физически адекватной модели восприятия яркости глазом человека.

В рамках этой работы был предложен и реализован алгоритм расчёта пространственно-углового распределения яркости с учётом многократных зеркальных отражений, что существенно при определении дискомфорта в сцене освещения, была создана экспериментальная установка для исследования дискомфорта и были повторены эксперименты, проведённые Лекишем и Гутом. Предложенный подход к формулированию критерия качества на основе интегральной оценки пространственно-углового распределения яркости является хорошей отправной точкой для создания программного комплекса проектирования ОУ на заданное качество освещения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Budak, V., Zheltov, V., Notfulin, R., Chemberaev, V.* Relation of Instant Radiosity Method with Local Estimations of Monte Carlo Method // WSCG. — 2016. — P. 189–197.
2. *Kajiya, J.T.* The rendering equation // Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH'86). — 1986. — Vol. 20, No. 4. — P. 143–150.
3. *Luckiesh, M., Guth, S.K.* Brightness in the visual field at borderline between comfort and discomfort // Illuminating Engineering. — 1949. — Vol. 44, No. 11. — P. 650–670.
4. *ван Боммель, В.* Светотехника завтра: что самое «жгучее»? // Светотехника. — 2010. — № 4. — С. 35–38.
5. *Hopkinson, R.G.* Evaluation of Glare // Illuminating Engineering. — 1957. — Vol. 52, No. 6. — P. 305–321.
6. *Scheir, G.H., Hanselaer, P., Bracke, P., Deconinck, G., Ryckaert, W.* Calculation of the Unified Glare Rating based on luminance maps for uniform and non-uniform light sources // Building and Environment. — 2015. — Vol. 84. — P. 60–67.

7. Lombardo, M., Lombardo, G., Lomoriello, D.S., Ducoli, P., Stirpe, M., Serrao, S. Interocular symmetry of parafoveal photoreceptor cone density distribution // *Retina*. – 2013. – Vol. 33, No.8. – P. 1640–1649.

8. Larson, G.W. et al. A visibility matching tone reproduction operator for high dynamic range scenes // *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. – 1997. – Vol. 3, No. 4. – P. 291–306.

9. Goral, C., Torrance, K.E., Greenberg, D.P., Battaile, B. Modeling the interaction of light between diffuse surfaces // *Computer Graphics*. – 1984. – Vol. 18, No. 3. – P. 213–222.

10. Christensen, N. J., Jensen, H. W. A Practical Guide to Global illumination and Photon Maps // *Proc. SIGGRAPH*, 2000.

11. Kalos, M.H. On the Estimation of Flux at a Point by Monte Carlo // *Nuclear Science and Engineering*. – 1963. – Vol. 16, No.1. – P. 111–117.

12. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике / Под ред. Г.И. Марчука. – Новосибирск: Наука, 1976.

13. Phong Bui Tuong. Illumination for Computer Generated Pictures // *CACM*. – 1975. – Vol. 18, No. 6. – P. 311–317.

14. Keller, A. Instant radiosity // *Proc. SIGGRAPH*, 1997. P. 49–56.

15. Батыршин И.З. Основные операции нечёткой логики и их обобщения. – Казань: Отечество, 2001. – 102 с.

С 17 по 20 апреля 2017 г. в ЦВК «Экспоцентр» прошла 26-я выставка «ЭЛЕКТРО», в составе которой был организован 2-й инновационный салон «Промышленная Светотехника – Москва», организатором которого выступила компания «Белтеко».

В экспозиции «Промышленная Светотехника» приняли участие ведущие отечественные компании, которым есть что предложить взыскательному потребителю в условиях нестабильной экономики: «Физтех-Энерго», *SDSBET*, «Интерьер», «Русвет», «ЛЕД-Эффект», «Планета-СИД», «БЕЛДЕЛ-ГРУПП», «Технологии Света», «ЭМКО», «Атомсвет-Энергосервис», «Свет СПб», «Трансвит», «Селекта», «РадиоВыключатели», «ЭКЗИТ-Свет» и др. В рамках насыщенной деловой программы 22 предприятия рассказали о своих новинках и опыте установки современных светотехнических приборов на промышленных объектах, в офисах и торговых центрах, в уличном и архитектурном освещении. Кроме того, ввиду соседства с выставкой «НЕФТЕГАЗ», примеры взрывозащищённого промышленного освещения были представлены на стендах компаний «Арман», «Горэлтех», «Гелиосити», *KLM Group*, *Suntek* и «ТЗА». Информационную поддержку салону «Промышленная Светотехника – Москва» предоставили 37 отраслевых изданий и веб-порталов.

Всего в экспозиции «ЭЛЕКТРО 2017» участвовали более 300 компаний из 14 стран мира. За 4 дня выставку посетили более 7000 специалистов, среди которых не менее 2000 инженеров и руководителей, занимающихся проектированием, установкой и обслуживанием систем освещения на промышленных предприятиях, в офисных, торговых, складских центрах, в учебных заведениях и государственных учреждениях, а также специалисты строительных организаций, предприятий ТЭК, сотрудники муниципальных образований, отвечающие за уличное и архитектурное освещение.

Посетители по достоинству оценили предложение доступной и качественной светотехнической продукции для промышленного и офисного освещения, прежде всего отечественного производства, узнали, как выгодно модернизировать освещение цеха, складского комплекса, магазина или делового центра, обсудили с коллегами вопросы выбора, тестирования и обслуживания светотехнических изделий, новые технологии управления освещением, поделились насущными проблемами и идеями.

В рамках деловой программы состоялись семинары:

- «Импортозамещение: наша светотехника для промышленно-сти, складских и торговых комплексов. Осветительные приборы для ТЭК, АЭС, взрывоопасных производств»
- «Комплексная модернизация осветительной сети предприятия»
- «Световое пространство современного города».

Все презентации докладчиков можно скачать из раздела «деловая программа» сайта [www.promlight-expo.ru/msk](http://www.promlight-expo.ru/msk).

19 апреля состоялась автобусная экскурсия «Вечерняя Москва глазами светодизайнера», организованная при поддержке и непосредственном участии экспертов Школы светодизайна *LiDS*. Первым пунктом программы экскурсии стало знакомство с демозалом Школы *LiDS*: «Световые эффекты и восприятие пространства». Далее экскурсия продолжилась по маршруту, охватившему самые знаковые световые точки вечерней Москвы: Смостровую площадку МГУ – Ленинский проспект – Крымский мост – Улицу Пречистенка – Храм Христа Спасителя – Гоголевский бульвар – Новый Арбат – Кудринскую площадь – Садовое кольцо – Тверскую улицу – Бульварное кольцо – Метро «Тургеневская» – Садовое кольцо – Набережную реки Яуза – Москворецкую набережную, и закончилась поздним вечером на Красной площади.

[www.cta.ru](http://www.cta.ru)  
27.04.2017



**Будак Владимир Павлович**, доктор техн. наук, профессор. Окончил в 1981 г. МЭИ. Профессор кафедры «Светотехника» НИУ «МЭИ». Член редколлегии журнала «Светотехника»



**Желтов Виктор Сергеевич**, кандидат техн. наук. Окончил в 2005 г. кафедру «Светотехника» НИУ «МЭИ»



**Нотфуллин Ренат Шамилович**, разработчик ПО. Окончил в 2016 г. кафедру «Светотехника» НИУ «МЭИ»



**Мешкова Татьяна Валерьевна**, инженер. Окончила в 2010 г. МЭИ (ТУ). Руководитель отдела управления проектами ЗАО «НТС». Аспирант кафедры «Светотехника» НИУ «МЭИ»