

Оценка качества внутреннего освещения в сценах с неравномерными блесковыми источниками

Владимир Будак, Виктор Желтов, Виктор Чембаев, Татьяна Мешкова
budakvp@mpei.ru | zheltov@list.ru | chembervint@gmail.com | tvmesh@mail.ru
кафедра светотехники

Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия

Современные методы моделирования уравнения глобального освещения позволяют рассчитывать пространственно-угловое распределение яркости, на основе которого появляется возможность получения качественных характеристик освещения сцены при светотехническом проектировании. Существующие нормативные базы предлагают лишь объединенный показатель дискомфорта, который имеет ряд ограничений в своем применении. В данной работе описывается критерий, учитывающий вклад от неравномерных протяженных источников бликов на общее качество сцены внутреннего освещения.

Ключевые слова: светотехника, компьютерная графика, критерий качества освещения, уравнение глобального освещения.

Interior lighting quality estimation for scenes with non-uniform light sources

Vladimir Budak, Victor Zheltov, Victor Chembraev, Tatiana Meshkova
budakvp@mpei.ru | zheltov@list.ru | chembervint@gmail.com | tvmesh@mail.ru
department of Lighting technology

Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia

Modern methods of global illumination equation simulation enables us to compute spatial angular radiance distribution, which could be used in determining qualitative characteristics of illumination scene for lighting design. Currently existing regulatory environments includes only Unified Glare Rating (UGR), which has a number of limitations in its application. This article considers new criteria, which takes into account the contribution from non-uniform extended glare sources to the overall quality of the indoor lighting scene.

Keywords: lighting technology science, computer graphics, illumination quality criteria, global illumination equation.

1. Введение

Вопрос качества внутреннего освещения занимает человечество с момента возникновения первых осветительных приборов (ОП). И, как и все процессы, неизбежно проходит сквозь этапы эволюции: выживание, социализация, удовольствие. И действительно, если первые осветительные установки в виде костров, помогали первобытным людям выживать и освещать свои жилища, далее, в античные времена появляются факелы, которые делают ОП мобильными и дают возможность создавать первые осветительные установки (ОУ). Активное развитие искусственного освещения приходится на 15-19 века, когда основным источником света являются всевозможные свечи и масляные лампы, которые позволяют людям работать в темное время суток, а также украшать свои дома и улицы. Ну и, разумеется, самый активный рост данной отрасли начинается с появлением электричества, когда уже по-настоящему можно сказать, что сфера искусственного освещения перешла на третий этап своей эволюции.

Теория расчета и нормирования ОУ практически полностью уже была изложена в учебных материалах к концу 70-х годов. В начале появляются методы расчета ОУ по определенным количественным характеристикам, таким как освещенность, яркость, световой поток, сила света. Постепенно формируется нормативная база. Математика, лежащая в основе этих методов не особо сложна с алгоритмической точки зрения, и появившиеся в конце 70х компьютеры общего назначения, уже могут справляться с задачами расчета ОУ. Особый прогресс начинается в 90гг с появлением персональных компьютеров, ростом их мощности и появлением систем автоматического

проектирования (САПР). Однако все эти методы расчета и инженерные практики пока еще не учитывают важнейший вопрос качества освещения.

2. Компьютерная графика и светотехника

В основе как компьютерной графики, так и расчета ОУ в светотехнике лежит уравнение глобального освещения (УГО), полученное еще в 1986 году J. Kajia [4]

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

где $L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}})$ – яркость светового поля в точке \mathbf{r} по направлению $\hat{\mathbf{l}}$, $\sigma(\mathbf{r}; \hat{\mathbf{l}}, \hat{\mathbf{l}}')$ – коэффициент яркости элемента поверхности в точке \mathbf{r} в направлении $\hat{\mathbf{l}}$ при его направленном освещении параллельным пучком света в направлении $\hat{\mathbf{l}}'$, часто называемая двунаправленной функцией рассеяния (отражения или пропускания), L_0 – прямая компонента яркости, непосредственно от источников, $\hat{\mathbf{N}}$ – нормаль в точке \mathbf{r} к элементу поверхности сцены. Крышечкой над вектором мы обозначаем единичные вектора. Контурный интеграл в уравнении означает интегрирование по полному телесному углу, элемент которого обозначен через $d\hat{\mathbf{l}}'$.

Моделируя УГО, мы получаем пространственно-угловое распределение яркости, т.е. визуализацию 3М сцен. Уравнение представляет собой интегральное уравнение второго рода, и, соответственно, в общем виде не имеет аналитического решения (за исключением некоторых частных случаев, которые могут быть применены для

оценки того или иного численного метода. (Фотометрическая сфера и “задача Соболева”). На сегодняшний день существует ряд численных методов решения УГО, однако, все они имеют ряд допущений, отражающихся в конечном счете на достоверности расчета.

На решении УГО построено и современное моделирование ОУ, что так тесно связывает компьютерную графику и светотехническое проектирование ОУ. Однако наиболее распространенные инженерные методы моделирования ОУ на сегодняшний день основываются не на решении УГО, а на решении уравнения излучательности [3] методом конечных элементов [7]:

$$M(\mathbf{r}) = M_0(\mathbf{r}) + \frac{\sigma(\mathbf{r})}{\pi} \int_{\Sigma} M(\mathbf{r}') F(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \Theta(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d^2 \mathbf{r}', \quad (2)$$

где $M(\mathbf{r})$ – светимость в точке \mathbf{r} , $M_0(\mathbf{r})$ – начальная светимость в точке \mathbf{r} непосредственно от источников света в приближении одного отражения, $\Theta(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ – функция видимости точки \mathbf{r} из точки \mathbf{r}' (1 если видна и 0 если не видна), $F(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ – элементарный форм-фактор [7], $\sigma(\mathbf{r})$ – коэффициент отражения.

При светотехническом проектировании ОУ одним из важнейших аспектов является определение нормируемых характеристик. Эти характеристики можно классифицировать на 2 типа: количественные и качественные. К количественным относятся такие характеристики, как освещенность, яркость, а также производные от них величины – средняя освещенность, неравномерность и т.п. Данные характеристики зарегулированы нормативными документами, на основании которых на сегодняшний день и производится проектирование и расчет ОУ.

Однако, человеческий глаз реагирует на яркость, падающего на него излучения, но не на освещенность, в то время как большинство существующих норм нормируют освещенность. Эта ситуация объясняется тем, что еще до недавнего времени численные методы и имеющие вычислительные средства не позволяли моделировать пространственно-угловое распределение яркости с достаточным уровнем достоверности. Поэтому самые распространенные компьютерные программы для инженерного светотехнического моделирования осветительных установок, такие как DIALux [9] и Relux [10], основываются как раз на методе излучательности.

За последние несколько лет численные методы решения уравнения глобального освещения, а кроме того, и вычислительные мощности компьютеров получили значительное развитие. Огромный вклад в развитие алгоритмов решения УГО внес взрывной рост трехмерной компьютерной графики, как отрасли, во многом благодаря задачам САПР и компьютерных игр. Так или иначе наличие этих самых методов позволяет уже сегодня перейти к моделированию непосредственно яркости. Вопрос в том, что с ней дальше делать? Еще в 1915г американская ученая Клэрэнс Фери в своей работе [1] показала, что именно пространственно-угловое распределение яркости определяет дискомфорт, а значит и качество освещения. Поэтому логичным кажется переход от проектирования ОУ по нормируемым количественным характеристикам к проектированию на заданное качество освещения. На сегодняшний день практически еще не существует нормативной базы для качества освещения. Среди нормируемых качественных характеристик в инженерной практике используется лишь объединенный показатель дискомфорта UGR:

$$UGR = 8 \lg \left[\frac{0,25}{L_a} \sum_{i=1}^N \frac{L_i^2 \omega_i}{p_i^2} \right], \quad (3)$$

где L_i – яркость блеского источника, кд/м²; ω_i – угловой размер блеского источника, стер; p_i – индекс позиции блеского источника относительно линии зрения; L_a – яркость адаптации, кд/м².

UGR учитывает яркость точечных источников света, их угловой размер и положение в поле зрения. Таким образом, данный критерий позволяет учитывать так называемую блескость от малоугловых источников, однако в реальной жизни, источники часто бывают протяженными и не равнояркими. Кроме того, UGR не учитывает и блики на диффузно-направленных отражающих поверхностях. В настоящее время ведутся активные работы по исследованию возможностей нивелирования текущих ограничений UGR [2].

3. Качество внутреннего освещения

Качество внутреннего освещения непрерывно связано с такими понятиями как дискомфорт и блескость. Для глаза человека, как для приемника, воспринимающего сцену освещения, яркость, создаваемая осветительными установками, может, как помогать выполнению поставленной задачи, т.е. осветить тот или иной предмет, текст, рабочую поверхность и т.д., так и мешать – например, в случае если отраженная яркость предмета будет значительно превосходить яркость адаптации (фона), или будут появляться блики. Наглядным примером может служить Панно из майолики “Метростроевцы”, рис. 1, которое, как предмет искусства, было призвано украшать переход станции московского метро Комсомольская, рассказывая исторический сюжет проектирования станции, однако, за счет невозможности рассчитать качество освещения данной сцены на стадии проектирования ОУ, мы видим, что светильники на потолке создают яркие блики на хорошо отражающем кафеле, что мешает прочитать саму картину.



Рис. 1. Панно из майолики «Метростроевцы».

Стоит отметить, что и на сегодняшний день этот эффект не может быть учтен средствами САПР, которые из качественных критериев учитывают только UGR.

Другим примером может быть освещение в учебном классе. На рис. 2 мы видим насколько блики на доске мешают учащимся прочитать информацию с доски.

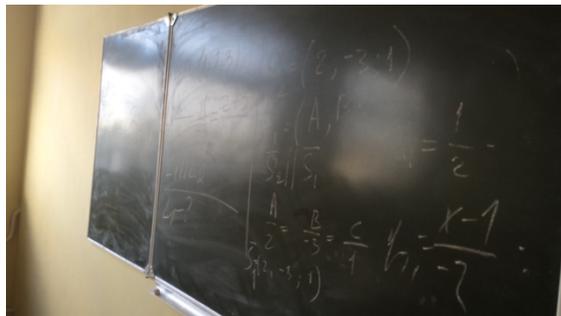


Рис. 2. Изображение классной доски.

Что же такое качество освещения? В работе [6] была произведена попытка сформулировать определение критерия качества освещения: *“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”*. Кроме того, авторы предложили новый подход к определению качества освещения. Подход основан на представлении качества освещения в виде одного числа.

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

где $K_{пор}$ - пороговое значение контраста, $p(x)$ - 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, $h(x)$ - функция учитывающая значимость той или иной точки для качества освещения.

Как уже упоминалось выше на сегодняшний день существует только один нормируемый критерий качества освещений - UGR, однако, он имеет ряд ограничений в применении. Новый единый критерий качества внутреннего освещения позволяет сравнивать разные сцены освещения на предмет удобства выполнения зрительной работы в них. Критерий учитывает полное пространственно-угловое распределение яркости для заданной точки наблюдения, поэтому позволяет учитывать вклад не только точечных блестящих источников, но и протяженные неравнояркие источники, в т.ч. и вклад от многократных переотражений.

Для нормирования критерия и проверки его работоспособности было проведено ряд экспериментов на лабораторной установке, рис. 3, собранной на кафедре светотехники НИУ МЭИ. Установка представляет матово-белую панель с установленными на ней светодиодными модулями разной формы и конфигурации. Подробное описание экспериментальной установки, а также методик проведения экспериментов изложено в статье [8].

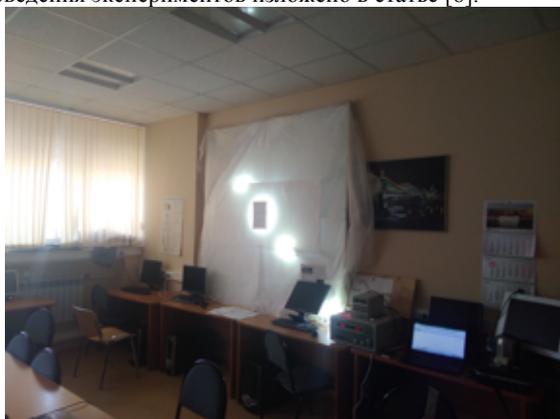


Рис. 3. Лабораторная установка оценки границы качества освещения.

Первым экспериментом на установке был поставлен опыт, повторяющий опыт Лекиша и Гутта [5], по установке границы комфорт-дискомфорт. Это было необходимо сделать, чтобы верифицировать установку. После этого был поставлен эксперимент по оценке комфортности освещения в зависимости от контраста между яркостью освещения рабочего пространства к яркости адаптации, рис. 4. Кроме того, было исследовано влияние формы источника света на уровень дискомфорта выполнения зрительной работы.



Рис. 4. Эксперимент по установлению границы комфорт-дискомфорт.

При исследовании критерия качества освещения испытуемые решали стандартную зрительную задачу – чтение текста. Вначале в течение 2-х минут проходила адаптация при средней яркости в фовиальной части 150 кд/м². В поле зрения при этом вокруг листа формировался протяженный яркий блик. После чего яркость блика последовательно увеличивалась и задачей испытуемого было определение порогов смены ощущений при решении зрительной задачи по шкале: безразлично, дискомфортно, неудобно и невыносимо.

В следующем эксперименте, рис. 5, мы добавили блики в периферийной части зрения наблюдателя.

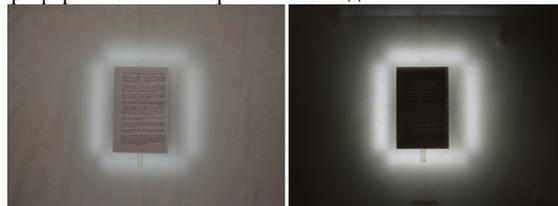


Рис. 5. Эксперимент с бликами в периферийной части зрения.

В момент регистрации одновременно с наблюдателями производилась съемка в формате RAW, что позволило получить пространственно-угловое распределение яркости в сцене наблюдения. В результате были получены распределения критерия качества от яркости блика.

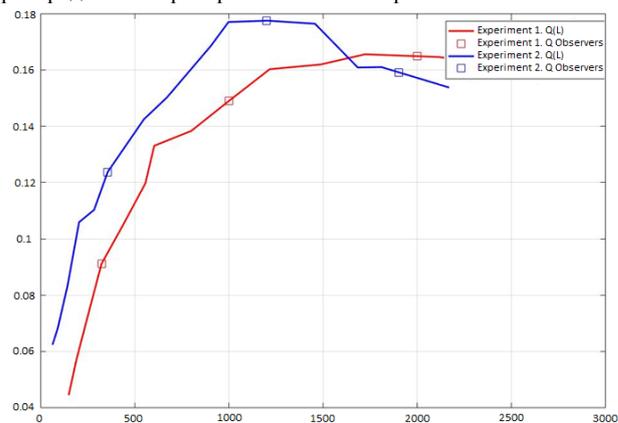


Рис. 6. Результаты экспериментов.

Как видно на рис. 6, в результате обоих экспериментов с различной яркостью адаптации мы получили близкие распределения, что подтверждает тот факт, что наш критерий качества может применяться для оценки сцен освещения с неравномерными и протяженными источниками света.

4. Заключение

В данной работе мы провели верификация критерия оценки качества внутреннего освещения на примерах реальной зрительной работы. Результаты экспериментов говорят о том, что критерий, скорее всего, может быть использован для оценки качества освещения при светотехническом проектировании. Однако, на текущий момент, статистика еще довольно мала, и очевидно, что перед нами стоит еще большая работа по экспериментальной апробации критерия и его нормировке. Кроме того, ранее нами был разработан алгоритм расчета видо-независимого пространственно-углового распределения яркости. Применяя данный алгоритм с полученным критерием оценки качества, видится логичным попытаться автоматизировать оценку качества сцены освещения для реальных задач. Например, понятно, что наблюдатель может быть не один, и в одном и том же помещении у него может быть несколько различных зрительных задач. Таким образом в нашей будущей работе нам бы хотелось попытаться разработать методику проектирования ОУ на заданное качество освещения, основанную на полученном критерии.

5. Литература

- [1] Ferree С и Rand G, The efficiency of the eye under different conditions of lighting // Tr. IES, 10, 407-415.
- [2] Funke C., Schierz Ch., Extension of the unified glare rating formula for non-uniform LED luminaires // Lux junior, 2015
- [3] Goral C., Torrance K., Greenberg D., Battaile B. Modeling the interaction of light between diffuse surfaces // Computer Graphics, 1984. Vol. 18, No. 3. P.213-222.
- [4] Kajiya J.T. The rendering equation // Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH'86), 1986. V.20, N4. P.143-150.
- [5] Luckiesh M., Guth S.K. Brightness in the visual field at borderline between comfort and discomfort // Illuminating Engineering, 1949. V.44, No. 11. P.650
- [6] Будак В.П., Желтов В.С., Мешкова Т.В., Хотфуллин Р.Ш. Оценка качества освещения на основе пространственно-углового распределения яркости // Светотехника. 2017. № 3. С. 17-22.
- [7] Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. —М.: Мир, 1984
- [8] Vladimir P. Budak, Victor S. Zheltov, Tatiyana V. Meshkova, and Renat Sh. Notfullin, Evaluation of illumination quality based on spatial-angular luminance distribution // Svetotekhnika No. 3, 2017, pp. 17–22
- [9] www.dialux.de
- [10] www.relux.biz

Об авторах

Будак Владимир Павлович, д.т.н., профессор кафедры светотехники национального исследовательского университета "МЭИ".

Желтов Виктор Сергеевич, к.т.н., ассистент кафедры светотехники национального исследовательского университета "МЭИ".

Чембаев Виктор Дмитриевич, аспирант кафедры светотехники национального исследовательского университета "МЭИ".

Мешкова Татьяна Валерьевна, аспирант кафедры светотехники национального исследовательского университета "МЭИ".