

Современное состояние и перспективы развития компьютерных методов моделирования осветительных установок

В.П. БУДАК, В.С. ЖЕЛТОВ

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

Аннотация

Проанализировано развитие методов моделирования осветительных установок (ОУ) на компьютере за последние 30 лет, которое началось с попыток автоматизации рутинных этапов проектирования ОУ с помощью компьютера. Описаны возникавшие при этом проблемы и способы их решения, реализованные в настоящее время в виде программ, визуализирующих на экране дисплея пространственно-угловое распределение светового поля в ОУ на основе численного решения уравнения глобального освещения, строго описывающего световые характеристики в приближении геометрической оптики.

Ключевые слова: осветительные установки, теория глобального освещения, радиосити, излучательность, трассировка лучей, мгновенная излучательность, метод Монте-Карло.

1. От проектирования к моделированию осветительных установок

Особенностью научно-технического прогресса на сегодня является цифровая революция, состоящая в том, что вся система знаний приобретает цифровую форму файлов, баз данных, программ расчёта, систем автоматизированного проектирования. При этом, если на первом этапе в середине 90-х годов прошлого века с появлением и массовым распространением персональных компьютеров с помощью компьютерных программ лишь автоматизировали работу инженера-проектировщика, перенося изнуряющие вычисления на компьютер, то дальнейшее развитие цифровых технологий привело к возникновению принципиально новых алгоритмов и программ, открывающих совсем иные горизонты в создании и разработке

новых систем. Сейчас в литературе обсуждается термин «вторая цифровая революция», в результате которой компьютеры будут выполнять функции, которые ранее даже и не предполагалось переносить на них, например, управление транспортными средствами без водителя.

Одной из важнейших областей светотехники, где цифровая революция произошла наиболее ярким и драматическим образом, является проектирование ОУ. Как было сказано, на первом этапе на компьютер были переложены стандартные и наиболее рутинные процедуры проектирования ОУ. На этом этапе возникла идея – если программы рассчитывают освещённость, а, следовательно (в предположении, что все поверхности отражают свет диффузно, что было общепринятым при расчёте ОУ), и яркость, то выведя это распределение на экран, мы увидим изображение установки. Однако это оказалось не так. На рис. 1 показано синтетическое изображение простейшей сцены: стола, накрытого полосатой скатертью, на которой располагаются металлическая полусфера и стеклянный цилиндр. Вся сцена освещена параллельным пучком света. На рис. 1, а эта сцена отображена в том виде, который был бы получен при проведении расчётов на основе закона обратных квадратов, что в то время было общепринятой схемой расчёта ОУ. Как видим, это изображение выглядит совершенно нереалистично, глаз отказывается воспринимать полусферу как металлическую, а цилиндр считать стеклянным. Главные причины неприятия сцены – это резкие тени и отсутствие отражений объектов друг в друге. Такой метод расчёта синтетического изображения в компьютерной графике получил название локальной модели освещения [1]. Очевидно, что для реалистической визуализации сцен необходим алгоритм учёта многократных отражений (пропусканий) в сцене – глобальное освещение [1].

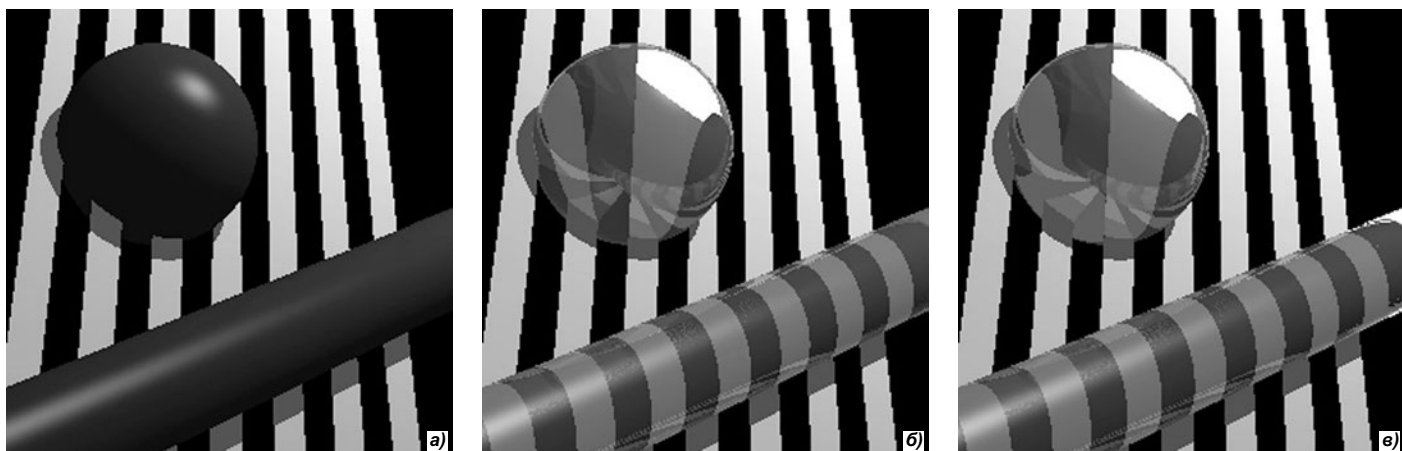


Рис. 1. Визуализация простейшей сцены освещения при учёте различного количества кратностей отражений: а – однократное отражение; б – 8 отражений; в – 64 отражения

Поэтому настоящая цифровая революция в расчёте ОУ произошла благодаря развитию не только вычислительной техники, но и математических методов. В 1986 году *J. Kajiya* сформулировал уравнение визуализации, представляющее собой уравнение Фредгольма второго рода [2]:

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

где $L(r, \hat{l})$ – яркость светового поля в точке r в направлении \hat{l} , $\sigma(r; \hat{l}, \hat{l}')$ – коэффициент яркости элемента поверхности в точке r в направлении \hat{l} при направленном освещении этого элемента параллельным пучком света в направлении \hat{l}' , часто называемым двунаправленной функцией рассеяния (отражения или пропускания), L_0 – прямая (непосредственно от источников) компонента яркости, \hat{N} – нормаль в точке r к элементу поверхности сцены. Здесь и далее «крышечкой» над вектором будем обозначать единичные векторы направлений, играющие исключительно важную роль в светотехнике. Контурный интеграл в (1) означает интегрирование по полному телесному углу, элемент которого обозначен через $d\hat{l}'$.

Уравнение является замкнутым для определения искомого распределения яркости $L(r, \hat{l})$, однако использовать его для разработки численных методов затруднительно, поскольку нас интересует пространственная зависимость яркости, а интегрирование в уравнении происходит по телесному углу. Используя неизменность яркости вдоль луча визирования и соотношение между телесным углом $d\hat{l}'$ и площадью элемента d^2r' , вырезаемым им из отражающей свет в точку r поверхности, нетрудно получить новую форму уравнения, получившую название уравнение глобального освещения (УГО) [3]:

$$L(r, \hat{l}) = L_0(r, \hat{l}) + \frac{1}{\pi} \int_{\Sigma} L(r', \hat{l}') \sigma(r; \hat{l}, \hat{l}') F(r, r') \Theta(r, r') d^2r' \quad (2)$$

где $F = \frac{|\langle \hat{N}(r), (r-r') \rangle| |\langle \hat{N}(r'), (r-r') \rangle|}{(r-r')^4}$ – элементарный

форм-фактор или коэффициент использования, $\Theta(r, r')$ – функция видности элемента d^2r' из точки r . Символом Σ обозначены все поверхности, многократные отражения от которых принимаются в расчёт.

Определение Σ нетривиально, поскольку мы всегда исключаем из расчёта ОУ какие-то реальные поверхности, например, коридор при расчёте комнаты или улицу при расчёте естественного освещения. Множество поверхностей, которые принимаются в расчёт, принято называть сценой освещения.

Точное решение УГО на сегодняшний день не найдено. Поэтому на практике его решают численно. Для этого все поверхности, входящие в сцену освещения, заменяют сеткой из плоских граней. При этом интеграл в уравнении заменяется конечной суммой, что сводит интегральное уравнение к системе линейных алгебраических уравнений. В математике подобный приём решения уравнений получил название метода конечных элементов [4]. Для вы-

сокой точности решения необходимо разбивать сцену по пространству на очень малые пространственные и угловые элементы, что приводит к необходимости решать очень большую систему из миллионов уравнений. Вследствие неизбежности округления любой операции на компьютере, такая задача становится математически некорректной. Единственно возможным устойчивым методом решения такой системы является метод итераций, что физически эквивалентно трассировке лучей. Отметим, что впервые метод энергетического расчёта оптических систем трассировкой лучей предложен в [5], а соответствующий расчёт световых приборов – в [6, 7].

Если провести расчёт описанной сцены методом трассировки лучей с учётом 8 коллизий (переотражений и пропусканий), то получим изображение, приведённое на рис. 1, б. Возникает законный вопрос – а сколько отражений нужно учесть? На рис. 1, в показано изображение, полученное с учётом 64 отражений – нетрудно отметить, что учёт 64 коллизий очень существенен для реалистического воспроизведения изображения сцены. И это для простейшей сцены. Очевидно, что в сценах внутреннего освещения, где стены, потолок и пол расположены напротив друг друга, счёт отражений может идти на тысячи. Для компьютеров конца 80-х – начала 90-х это не представлялось возможным.

Ситуация существенно упрощается, если предположить, что сцена освещения состоит только из диффузно отражающих поверхностей: $\sigma(r; \hat{l}, \hat{l}') = \sigma(r)$. В этом случае яркость не зависит от направления \hat{l} и однозначно связана со светимостью грани отражённым светом $M(r) = \pi L(r)$, что позволяет преобразовать (2) к виду:

$$M(r) = M_0(r) + \frac{\sigma(r)}{\pi} \int_{\Sigma} M(r') F(r, r') \Theta(r, r') d^2r', \quad (3)$$

где $M(r)$ – светимость в точке r , $M_0(r)$ – начальная светимость в точке r непосредственно от источников света в приближении одного отражения. Уравнение впервые было получено в теории расчёта ОУ и получило название уравнение излучательности (*radiosity*) [8].¹

Уравнение излучательности также решается заменой интеграла конечной суммой, но, вследствие отсутствия угловой зависимости у яркости, количество уравнений уменьшается в тысячи раз, что делало такое решение доступным для компьютеров 90-х. Отметим, что в светотехнике метод излучательности в конечных разностях был впервые сформулирован в работе [9], интегральное уравнение выведено в [10], а УГО впервые было получено в работе советского теплофизика Г.Л. Поляка [11] для лучистого теплообмена в печах, однако оно не оказало влияние на развитие компьютерной графики.

Решение уравнения излучательности методом конечных элементов и получило название метода излучательности. В этом случае конечные элементы поверхности соединяются конечными пучками, а не бесконечно тонкими

¹ Термин *radiosity* был введён в английский язык П. Муном, и по правилам образования существительного его можно перевести как «излучательность». Иногда термин *radiosity* «переводят» на русский язык как «радиосити». На сегодняшний день в русскоязычной литературе оба термина – радиосити и излучательность – являются синонимами.

лучами метода трассировки. Это существенно сокращает время счёта. Впервые метод излучательности был реализован в программе *Lightscape*, а на сегодняшний день именно метод излучательности лежит в основе ключевых программных продуктов для моделирования ОУ — *DIALux* [12] и *Relux* [13].

Эти программы позволяют рассчитывать не значения освещённости в некоторых точках сцены, а световое поле во всём объёме сцены. При этом распределение светового поля в сцене при учёте многократных отражений зависит не только от источников света, но и от объектов сцены и их взаимного положения. Тем самым, в этих программах реализуется не проект ОУ, а её действующая, «живая» модель, а процесс проектирования заменяется моделированием.

УГО и методы его решения составляют основу как программ компьютерной графики по визуализации виртуальных объектов, так и моделирования ОУ. Именно УГО позволяет рассчитать световое поле во всём объёме сцены освещения, а сам процесс создания синтетического изображения представляет собой визуализацию пространственно-углового распределения яркости. При этом можно сказать, что воплотились мечты создателей начертательной геометрии Гаспара Монжа (*Gaspard Monge*, 1746–1818) и Юлиуса Плюккера (*Julius Plücker*, 1801–1868), чтобы формулы выражали красоту реального мира.

2. Эра излучательности

После реализации метода излучательности, он стал по сути стандартом для всех программ компьютерной графике по созданию синтетических изображений трёхмерных сцен. Главная привлекательная сторона метода — синтетические изображения, создаваемые на основе решения методом излучательности, получались за приемлемое время и по качеству соответствовали качеству фотографии объекта. Несовпадение диапазона яркостей экрана дисплея с диапазоном яркостей в сцене освещения перед выводом на экран обусловило неизбежность масштабирования по яркости, что приводит к фотореалистическому, но не визуальному, отображению сцены, поскольку глаз человека является сложным, нелинейным приёмником. Однако люди давно привыкли судить об объектах по их фотографиям, что даёт им возможность увидеть ещё только проектируемый объект.

В светотехническом проекте всегда присутствуют три заинтересованные стороны: заказчик, дизайнер и проектировщик. Каждый из них описывает и оценивает качество ОУ в своей терминологии. Фотография (синтетическое изображение на экране) создаёт единый язык общения и понимания между ними. Этот факт оказался решающим, и программы моделирования ОУ быстро полностью вытесняют другие методы проектирования ОУ.

Метод излучательности стал первым методом, позволившим учесть многократные отражения в диффузном приближении. И именно диффузная модель отражения стала краеугольным камнем этого метода. Однако не менее существенным фактором является то, что визуализация строится на основе расчёта ОУ методом излучательности, что существенно улучшает обычную методику. При этом проектировщик получает не значения освещённости или яркости в отдельных точках сцены освещения, а па-

раметры светового поля во всех её точках. Это позволяет представить распределение светового поля в различных формах: таблицы, изолюксы, фиктивные (псевдо) цвета, что снимает недостатки фотореалистического воспроизведения: изображение на экране масштабируется, контрастируется, изменяется по цвету. Тем самым снимается главная проблема проектирования ОУ: сам объект проектирования — свет — в отличие от любого другого объекта, невидим, и только созданная ОУ позволит увидеть все объекты в целом.

В свою очередь, изображение объекта в сочетании со средствами анализа распределения света дали возможность проектировать ОУ не только опираясь на значения освещённости или яркости в фиксированных точках сцены, но и учитывая качество освещения: дискомфорт, световой ритм, акценты. Программы моделирования ОУ, решая проблемы расчёта и анализа распределения светового поля по сцене и создавая изображение сцены, открыли широкие возможности для дизайна ОУ. По сути мы становимся свидетелями нового подхода к созданию ОУ и, соответственно, возникновения новой профессии — светодизайн.

Дальнейшее развитие программ моделирования ОУ и основанного на нём светодизайна выявили и серьёзные проблемы метода излучательности:

- Правильное определение дискомфорта требует точного расчёта распределения яркости в бликах от больших поверхностей в сцене. В рамках метода излучательности расчёт многократных отражений проводится в предположении диффузного отражения от всех поверхностей, а наличие блеска уточняется на финальной стадии расчёта — визуализации, — при обратной трассировке лучей, что позволяет сформировать блеск скорее в синтетическом изображении, не давая количественной оценки распределения яркости.

- Метод излучательности оказывается практически совершенно неэффективным при наличии в сценах прозрачных поверхностей, роль которых непрерывно возрастает: стеклянные фасады, прозрачные офисные перегородки.

- С ростом сложности сцены трудоёмкость метода излучательности растёт существенно быстрее, чем в случае метода трассировки лучей, и, начиная с некоторого порога, трассировка становится намного эффективнее. Это не позволяет моделировать методом излучательности сложные сцены: большие многозональные площадки, этажи зданий, улицы.

3. Трассировка лучей

Дальнейшее развитие методов решения УГО произошло в задачах компьютерной графики по реалистичной визуализации трёхмерных сцен. Одним из значимых методов стал метод фотонных карт [14]. Этот метод основан на рассмотрении переноса излучения частицами — фотонами, двигающимися по световым лучам и переносящими некоторые дискретные порции световой энергии. На начальном этапе фотоны испускаются источником света в соответствии с его распределением энергии излучения. В процессе моделирования, фотоны трассируются в сцене и соударяются с различными элементами сцены. В зависимости от свойств материала поверхности, с фотоном происходят различные события: рассеянное отражение,

зеркальное отражение, преломление или поглощение. При этом конкретное событие, происходящее с фотоном, выбирается на основе свойств материала поверхности и статистического метода «Русская рулетка» [14]. Каждый рассеянно отражённый фотон при этом вносится в список. После накопления статистики, строится фотонная карта в виде некоторой структуры пространственного разбиения, позволяющей быстро найти N ближайших фотонов. На последнем этапе происходит сбор яркости.

Воспользовавшись известным соотношением между яркостью падающего излучения и потоком:

$$L(r, \hat{l}') = \frac{d^2\Phi(r, \hat{l}')}{\cos\theta d\omega d\hat{l}' dA}, \quad (4)$$

можно переписать уравнение (1) в виде

$$L(r, \hat{l}) = L_0(r, \hat{l}) + \frac{1}{\pi} \int \sigma(r; \hat{l}, \hat{l}') \frac{d^2\Phi(r, \hat{l}')}{dA}. \quad (5)$$

Падающий поток $\Phi(r, \hat{l}')$ можно аппроксимировать с помощью фотонной карты, собрав N ближайших к точке r фотонов:

$$L(r, \hat{l}) \approx L_0(r, \hat{l}) + \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^N \sigma(r; \hat{l}, \hat{l}') \frac{\Delta\Phi(r, \hat{l}')}{\Delta A}, \quad (6)$$

где ΔA – площадь полусферы, образованной относительно точки r с радиусом, равным расстоянию до самого дальнего фотона.

В результате метод фотонных карт позволяет моделировать уже само УГО и получать яркость с учётом многократных диффузно-направленных отражений. При этом все иные процессы взаимодействия с материалом (зеркальное отражение, преломление) должны быть учтены другими способами. Рассмотренный выше вариант сбора яркости приводит к значительному шуму в получаемых результатах.

Для устранения шума используется финальный сбор. В методе финального сбора из заданной точки в полусферическое пространство испускается некоторое число лучей, и яркость собирается уже в тех местах полусферы, куда попали лучи. На основе полученных значений яркости рассчитывается яркость для заданной точки. Это позволяет значительно снизить уровень шума [14], но при этом возрастает объём вычислений.

В 2000-е годы метод фотонных карт очень активно использовался в компьютерной графике, а позднее он нашёл своё место и в светотехнике. В основу нового продукта *DIALux Evo* лёг именно метод фотонных карт [12]. Основных предпосылок для перехода *DIALux* с метода конечных элементов было две: ограничения на модель отражения и ограничения на размер сцены.

В последние годы в светотехническом сообществе витает идея о том, что нельзя рассматривать отдельно моделирование внутреннего и наружного освещения, нельзя раздельно моделировать большие внутренние пространства. Моделирование освещения должно быть единым неразрывным процессом для всего объекта и рассматриваться как единое целое. Однако эта предпосылка долгое время упиралась в техническую сложность моделирования боль-

ших объектов методом излучательности. Дело в том, что время счёта растёт пропорционально квадрату количества элементов. В методе фотонных карт эта зависимость менее характерна, и в некотором приближении она сводится к росту вычислений лишь в процессе трассировки лучей, когда приходится перебирать большее число объектов. Появление *DIALux Evo* на основе метода фотонных карт и должно позволить перейти на иной уровень моделирования ОУ. Однако в инженерной практике на данный момент это фактически так и не произошло.

Отметим, что на сегодняшний день существуют специально оптимизированные библиотеки трассировки лучей, учитывающие особенности архитектуры современных центральных и графических процессоров, например, *Intel Embree* [15]. Эти библиотеки позволяют разработчикам современных светотехнических программ абстрагироваться от ряда сложнейших вопросов оптимизации и сосредоточиться на решении своих прикладных задач.

В последнее время большое место в компьютерной графике занял метод *Instant Radiosity*, впервые изложенный в феноменологическом подходе в 1997 г. в работе А. Келлера [16]. В этой работе Келлер качественно рассматривает процесс моделирования многократных отражений в УГО на основе фиксации в сцене набора вторичных источников и расчёта их вклада в яркость для исследуемой точки. Однако как показано в нашей работе [17], этот метод основан на хорошо известных локальных оценках, впервые предложенных в атомной физике [18]. Своё дальнейшее мощное развитие локальные оценки получили при решении уравнения переноса излучения в оптике атмосферы и океана [19].

УГО может быть записано в виде интеграла по пространству и разложено в ряд Неймана. После ряда преобразований полученное разложение может быть записано в виде [17]:

$$L(r, \hat{l}) = L_0(r, \hat{l}) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{\pi} \frac{L_0(r_{1i}, \hat{l}_{1i})}{p_1(r_{1i}, \hat{l}_{1i})} \frac{\sigma(r; \hat{l}_{1i}, \hat{l}) G(r_{1i}, r)}{p_2(r_{1i}, \hat{l}_{1i} \rightarrow r, \hat{l})} + \frac{1}{\pi^2} \frac{L_0(r_{1i}, \hat{l}_{1i})}{p_1(r_{1i}, \hat{l}_{1i})} \frac{\sigma(r_{2i}, \hat{l}_{1i}, \hat{l}_{2i}) G(r_{1i}, r_{2i})}{p_2(r_{1i}, \hat{l}_{1i} \rightarrow r_{2i}, \hat{l}_{2i})} \times \right. \\ \left. \times \frac{\sigma(r; \hat{l}_{2i}, \hat{l}) G(r_{2i}, r)}{p_2(r_{2i}, \hat{l}_{2i} \rightarrow r, \hat{l})} + \dots \right) \quad (7)$$

Это выражение может быть интерпретировано как цепь Маркова. В результате построения цепи Маркова можно на каждом её шаге оценивать ядро уравнения, определяющее вероятность схода с траектории в исследуемые точки r, \hat{l} . Накапливая статистику, мы получим непосредственно яркость в заданных точках в заданных направлениях [17]. Предложенный метод локальных оценок был реализован нами в рамках этой работы, и на рис. 2 приведён пример визуализации сцены, осуществлённой при помощи этого метода.

В настоящее время активно развиваются и другие методы моделирования УГО, из которых можно отметить: трассировку путей (*path tracing*) и расчёт переноса света методом Метрополиса (*metropolis light transport*) [20]. При этом методы и их реализацию можно разделить на два основных класса – смещённые и несмещённые. Несме-

щённые методы получили очень широкое развитие в прикладных задачах визуализации, в кино, в компьютерных играх, в симуляторах. Т.е. там, где важно не точное пространственно-угловое распределение яркости, а «фото-реалистичное» изображение.

4. Через тернии к звёздам

Феноменальное развитие методов моделирования УГО нашло применение в кино, телевидении, архитектурном проектировании и множестве других прикладных задач, но не в инженерной практике светотехнического проектирования ОУ. Ситуация кажется парадоксальной: в задачах компьютерной графики с помощью современных методов рассчитывается яркость с учётом многократных отражений, а в светотехнике используется главным образом освещённость. В то же время, такая ситуация является вполне закономерной.

Современные нормативные документы для внутреннего освещения, как российские [21], так и европейские [22], в качестве нормируемой характеристики используют освещённость и производную от неё равномерность освещённости. При этом отметим, что глаз человека не реагирует на освещённость, а видит яркость. Яркость же нормируется только в наружном освещении, например, в освещении автомобильных дорог или архитектурном освещении [23]. Такая ситуация легко объяснима — когда формировалась нормативная документация, моделировать яркость с учётом многократных отражений не было возможности. Не существовали ни методы моделирования, ни необходимые вычислительные мощности. Развитие вычислительной техники и методов математического моделирования позволило решать УГО, однако решалось оно с оглядкой на нормативные документы. Зачем считать пространственно-угловое распределение яркости, если нормируется интегральная характеристика — освещённость? Это приводит нас в замкнутый круг. Подтверждением этого становится *DIALux Evo*, основанный на методе, позволяющем моделировать яркость, но не нашедший своего места в инженерной практике.

Ситуация с нормированием количественных характеристик находит своё отражение и в области качественных характеристик. В инженерной практике на сегодняшний день, в основном, используется объединённый показатель дискомфорта *UGR* [21]

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

где L_i — яркость блёского источника, кд/м², ω_i — угловой размер блёского источника, стёр, p_i — индекс позиции блёского источника относительно линии зрения, L_a — яркость адаптации, кд/м². При этом при моделировании в существующих программных средствах будут учтены только непосредственно сами источники света, тогда как блики на отражающих поверхностях в показатель дискомфорта не войдут.

Результатом стала ситуация, когда количественно проектирование производится применительно к не воспринимаемой человеком характеристике — освещённости, а вопросы качества полностью возлагаются на опыт

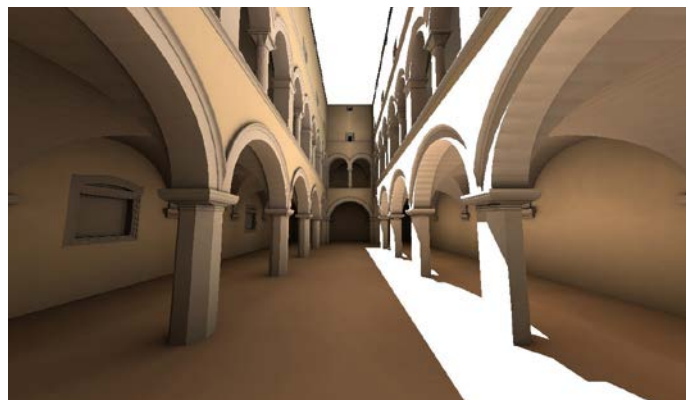


Рис. 2. Визуализация стандартной тестовой трёхмерной сцены *Dabrovic Sponza* локальными оценками метода Монте-Карло

и интуицию проектировщика. Появившиеся новые методы моделирования УГО позволяют подойти к вопросу пересмотра нормативной документации и формирования как новых количественных показателей, нормирующих пространственно-угловое распределение яркости, так и новых качественных характеристик, полученных на его основе.

Эволюционное развитие светотехнического моделирования ОУ на основе революции 90-х годов подходит к своему логическому завершению, и следующий шаг в развитии вновь должен стать революционным. Результатом этого шага должен стать переход от проектирования ОУ применительно к заданному распределению освещённости к проектированию применительно к заданному качеству освещения.

Другим важным направлением развития программ моделирования ОУ должен стать переход от фотореалистического синтеза изображения к реалистическому на основе использования равноконтрастных систем. Это позволит на основе законов цветоцветового подобия выводить такие изображения ОУ, какими их будет воспринимать глаз человека, что даст возможность заказчику и дизайнеру сравнивать различные варианты освещения и выбирать наилучший по визуальному восприятию. Однако это отдельная большая тема, выходящая за рамки настоящего обзора современных методов моделирования ОУ на компьютере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Foley, J.D., van Dam, A., Feiner, S.K., Hughes, J.F. Computer Graphics: Principles and Practice. — Addison-Wesley Professional, 1994.
2. Kajiya, J.T. The rendering equation // Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH'86). — 1986. — Vol. 20, No. 4. — P. 143–150.
3. Будаков В.П. Компьютерная графика — светотехнический проект на компьютере // Светотехника. — 1999. — № 1. — С. 22–25.
4. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. — М.: Мир, 1984/
5. Медведев В.Е., Парицкая Г.Г. Расчёт освещённости в изображении // Оптика и спектроскопия. — 1966. — Том 22, № 5. — С. 638–642.
6. Куц О.К., Митин А.И. Расчёт светораспределения зеркальных симметричных поверхностей с протяжённым источником света на ЭВМ // Светотехника. — 1976. — № 6. — С. 3–5.

7. Коробко А.А., Куц О.К. Использование метода Монте-Карло в светотехнических расчётах // Светотехника, 1986. № 10. – С. 14–17.

8. 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.

9. Yamauti, Z. The light flux distribution of a system of inter-reflecting surfaces // Journal of the Optical Society of America. – 1926. – Vol. 13, No. 5. – P. 561–571.

10. Moon, P. On Interreflections // Journal of the Optical Society of America. – 1940. – Vol. 30, No. 2. – P. 195–205.

11. Поляк Г.Л. Лучистый теплообмен тел с произвольными индикатрисами отражения поверхностей/ в кн.: Конвективный и лучистый теплообмен. – М.: АН СССР, 1960. – С. 118–132.

12. www.dialux.de

13. www.relux.biz

14. Christensen, N. J., Jensen, H. W. A Practical Guide to Global illumination and Photon Maps // Siggraph. – 2000. – Course 8, July 23. – 77 p.

15. Wald, I., Woop, S., Benthin, C., Johnson, G.S., Ernst, M. Embree – A Kernel Framework for Efficient CPU Ray Tracing // ACM Transactions on Graphics (proceedings of ACM SIGGRAPH). – 2014. – Vol. 33, No. 4, Article 143 (July 2014). – 8 p.

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

17. Budak, V., Zheltov, V., Notfulin, R., Chembayev, V. Relation of Instant Radiosity Method with Local Estimations of Monte Carlo Method // WSCG 2016. – P. 189–197

18. 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.

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

20. Pharr, M., Humphreys, G. Physically based rendering from theory to implementation. – Morgan Kaufmann Publishers, 2010.

21. ГОСТ Р 55710–2013 «Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений».

22. EN12464–1:2002 «The Lighting of Workplaces»

23. ГОСТ Р 55706–2013 «Освещение наружное утилитарное.. Классификация и нормы».

Минсельхоз США использует светильники с СД для исследований на кукурузе

Компания LumiGrow сообщила, что Министерство сельского хозяйства США (USDA) использует её светильники с СД при проведении исследований в области сельскохозяйственного освещения по выращиванию кукурузы и других культур, таких как соя. Служба сельскохозяйственных исследований USDA изучает влияние управления спектром излучения, которое стало возможным благодаря СД, на ускорение цветения растений и другие характеристики их роста.



Исследования по улучшению урожайности гибридных сортов кукурузы проводились ранее в теплицах с использованием натриевых ламп высокого давления (НЛВД). Однако применение СД имеет ряд преимуществ, включая возможность выбора спектра излучения светильников. Известно, что вырабатываемое НЛВД тепло приводит к преждевременному созреванию пыльцы таких растений, как кукуруза, которые имеют большую высоту и, тем самым, расположены близко к источнику света. В то же время, светильники с СД можно располагать близ растений, не создавая никаких связанных с нагревом проблем.

И всё же наиболее привлекательным для сельского хозяйства в применении СД является возможность управления спектром излучения. При этом СД позволяют как оптимизировать процесс фотосинтеза, так и влиять на цветение и форму каждого конкретного типа растений.

Предварительные результаты проведённых в USDA испытаний говорят о том, что под воздействием синего света растения начинают цвести на 3 дня раньше, а под воздействием красного света наблюдались утолщение стеблей и усиленный вегетативный рост.

Светильники с СД компании LumiGrow позволяют исследователям регулировать освещение растений на всём цикле выращивания растений. USDA использовало светильники «Pro 650» компании LumiGrow.

Полученные результаты будут переданы коммерческим сельскохозяйственным предприятиям для повышения урожайности растений.

www.ledsmagazine.com

03.01.2017

Освещение региональных автодорог

ООО «Светосервис-Подмосковье», которое входит в состав холдинга BL Group, завершило проект по установке светильников GALAD серии «ЖКУ 21 Гелиос» с натриевыми лампами ВД на 22 аварийно-опасных участках региональных автодорог. Помимо светильников производства ООО «Лихославльский завод «Светотехника», в проекте использовали опоры, созданные ООО «ОПОРА ИНЖИНИРИНГ».



До реализации проекта участки дорог освещены не были и представляли опасность как для пешеходов, так и для автотранспорта. Проект был реализован в рекордно короткие сроки: за один месяц.

Теперь освещение небезопасных участков, в частности, Пятницкого, Волоколамского, Старого Симферопольского и Щелковского шоссе соответствует действующим нормам.

Общая протяженность отремонтированных автодорог – более 30 км.

www.bl-g.ru

11.01.2017



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»