

# Физически корректное моделирование освещенности в задачах компьютерной графики

А.Г. Волобой, к.ф.-м.н.,  
Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН

**Аннотация.** В статье представлен подход к синтезу реалистичных изображений, основанный на физически аккуратном моделировании распространения света. При этом подходе важной проблемой является задание корректных оптических свойств материалов и источников освещения виртуальной сцены. Рассмотрены методы и подходы к заданию этих начальных данных, необходимых для достижения правдоподобного результата моделирования и визуализации.

## Введение.

Методы синтеза реалистичных изображений, основанные на физически аккуратном моделировании распространения света в различных средах, являются одним из современных направлений развития компьютерной графики. Рис. 1 иллюстрирует этот процесс.

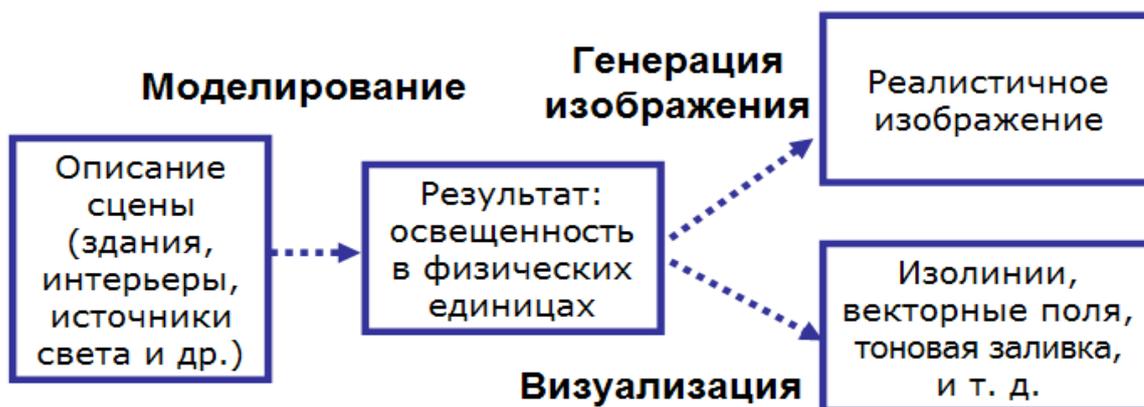


Рис. 1. Процесс генерации изображения.

Моделирование будем называть *физически аккуратным*, если методы моделирования основаны на физических законах распространения света и взаимодействия света с объектами. Под понятием *реалистичности* изображений будем понимать близость восприятия синтезированных изображений с восприятием фотографий, т.е. именно фотореалистичность является критерием качества синтеза изображений в нашем случае.

Созданные алгоритмы и программные средства представляют интерес для использования в архитектуре, градостроительстве, ландшафтном дизайне, проектировании систем освещения и дизайне интерьеров, автомобильной и авиационной промышленности и др. Важным аспектом является не просто реалистичность получаемых изображений, а их соответствие законам физики и оптики. Именно это соответствие позволяет проводить моделирование освещения интерьеров, проверять нормы освещенности в процессе разработки проекта.

Одним из способов подтверждения правильности разработанных алгоритмов являлся проект, осуществленный совместно с университетом Aizu Wakamatsu (Япония). Была воссоздана виртуальная

модель одного из холлов университета. Были измерены и заданы максимально корректно оптические свойства материалов, использованных при строительстве этого холла, а также источники освещения, расположенные там. Далее виртуальная модель холла была рассчитана и визуализирована с помощью системы, разработанной в ИПМ. Сравнение результата моделирования с фотографиями реального холла показало хорошее соответствие. Небольшие отклонения в основном связаны с неточностью задания геометрии или индикатрис рассеяния источников освещения (рис. 2).



Рис. 2. Сравнение результатов компьютерного моделирования холла университета (рисунок слева) с реальной фотографией (рисунок справа).

Однако для получения правдоподобных результатов необходимо максимально корректно задавать входные данные: геометрию виртуальной сцены, оптические свойства всех материалов и источников света, используемых в моделировании. Проблема с точным заданием геометрии была решена с помощью разработки plugins к таким известным системам автоматизированного моделирования, как 3DS Max, популярного среди архитекторов и дизайнеров интерьеров, и Catia, широко используемой в автомобильной и авиационной промышленности.

#### **Оптические свойства материалов.**

Правильное и физически корректное задание светорассеивающих (оптических) свойств изображаемых объектов и поверхностей является непростой задачей. В большинстве случаев эти свойства материалов неизвестны, и получить их можно только непосредственными измерениями. Наиболее общий способ описания светорассеивающих свойств поверхности – задание двунаправленных функций отражения/пропускания (ДФО/ДФП). ДФО/ДФП, заданная в каждой точке поверхности, определяет какая часть энергии, пришедшая с направления  $w_{in}$ , будет рассеяна поверхностью в направлении  $w_{out}$ . Таким образом, в общем случае, ДФО/ДФП в каждой точке является функцией двух направлений. В ИПМ был разработан аппаратно-программный комплекс, предназначенный для измерения спектрального и пространственного распределения света, рассеиваемого или пропущенного поверхностями. Прибор основан на оригинальной концепции, обеспечивающей одновременное измерение рассеяния в различных направлениях и высокое пространственное разрешение в критической

области вблизи направления зеркального отражения. Для параллельного получения большого объема пространственной информации используется камера на ПЗС-матрице.

Другим направлением стало моделирование новых оптически сложных материалов, таких как многослойные краски со сложной микроструктурой (типа перламутровых и «металлик»). В результате моделирования распространения света в их внутренней структуре, состоящей из плоскопараллельных однородных слоев, генерируется ДФО. Каждый слой состоит из прозрачного лака и взвешенных в нем пигментных частиц и интерференционных чешуек (рис. 3а). После проведенного моделирования полученные ДФО могут быть использованы при генерации реалистичных изображений автомобилей или других объектов, покрытых этими оптически сложными материалами (рис. 3б).

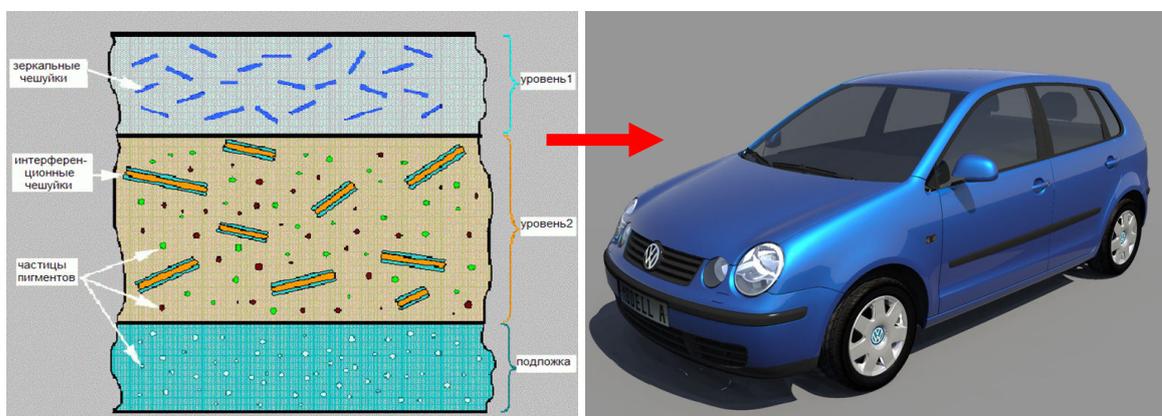


Рис. 3а. Структура многослойной краски.

Рис. 3б. Модель автомобиля, окрашенная смоделированной краской.

Моделирование тонкого красящего слоя, каким, например, являются чернила, характеризуется высокими концентрациями частиц и их маленькими размерами (порядка сотен нанометров). Лучевой подход или лучевое уравнение переноса практически не применимы для решения этой задачи. Поэтому был выбран путь непосредственного решения волновых уравнений, естественно, при некоторых ограничениях и упрощениях. В результате вычислительно-емкого моделирования распространения света в таком слое (время моделирования доходит до нескольких дней и даже недель на современных Core2Quad процессорах) получается ДФО, которая потом используется при генерации реалистичного изображения сцен, содержащих такие материалы.

Ткани являются сложным для визуализации и моделирования типом материала. Расчет ДФО ткани основан на моделировании освещенности. Освещенность ткани рассчитывается с учетом рассеяния света поверхностями и объемами нитей, ее образующих. Также принимается во внимание структура переплетения нитей, которая позволяет определить тени и свет, отбрасываемые одними нитями на другие. При расчете теней и объемного рассеяния света учитываются оптические характеристики материала, из которого состоит нить. Поверхностное рассеяние света нитью аппроксимируется по формуле Фонга. Полученный метод позволяет получать внешний вид тканей с учетом реальных оптических характеристик нитей разного типа (хлопковые, шелковые и др.).

### **Задание источников освещения.**

Для корректного задания источников света были разработана поддержка импорта гониограмм (индикатрис рассеяния) источников из формата IESNA. Большинство производителей осветительных приборов предоставляют эту информацию для своих продуктов.

Также было разработано моделирование естественного освещения. Небесное освещение задается с помощью географических координат, даты, времени суток и степени облачности. Моделирование небесного освещения для случаев 100% облачности и ее отсутствия соответствует стандарту Международной комиссии по освещению CIE. Небесное освещение с неполной облачностью моделируется с использованием интерполяции.

Другим методом задания освещения в графических комплексах может служить способ, при котором источником света является изображение реальных панорам с большим динамическим диапазоном яркостей. При этом источником света могут быть сфотографированные особым образом небо или помещение выставочного зала, и мы можем смоделировать, как будет освещен тот или другой объект в этих условиях. В результате использования этого подхода появляется возможность интегрировать моделируемые объекты с реальным окружением. На рис. 4 показана компьютерная модель автомобиля, «встроенная» в реальный природный ландшафт.



Рис. 4. Компьютерная модель автомобиля освещена сфотографированной панорамой.

### **Заключение.**

Методы физически корректного моделирования распространения света показали себя эффективным инструментом в архитектурном проектировании, автомобильной, авиационной и электронной промышленности, а также при разработке новых оптически сложных материалов.

Были найдены и разработаны практичные и эффективные способы задания начальных данных – материалов и источников освещения, - необходимых для получения достоверных результатов моделирования.