

# Компьютерная графика как эффективный инструмент развития современных технологий

А.Г. Волобой, В.А. Галактионов  
Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, Москва

## Аннотация

Компьютерная графика является не только интересной областью исследований и разработок алгоритмов, но и реально применяется в современном высокотехнологичном производстве. Приведены примеры практических задач, которые стало возможно решать именно с помощью методов и алгоритмов реалистичной компьютерной графики.

**Ключевые слова:** системы реалистичной визуализации, моделирование оптических систем, Монте-Карло трассировка лучей

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Компьютерная графика изначально зародилась как эффективное и мощное средство связи между человеком и вычислительной машиной. Использование графической формы представления информации, организация диалога между человеком и компьютером с использованием визуальных образов позволили существенно увеличить скорость обработки информации человеком, что привело к повышению эффективности исследований и разработок в самых различных областях науки и техники.

Однако с появлением методов синтеза реалистичных изображений, основанных на физически корректном моделировании распространения света, область применения компьютерной графики существенно расширилась. Созданные алгоритмы и программные средства стали представлять интерес для использования в архитектуре, градостроительстве, проектировании систем освещения, в автомобильной и авиационной промышленности и др.

В докладе приведено несколько примеров практических задач, связанных с построением физически корректных реалистичных изображений и моделированием распространения света в различных средах, с которыми авторы сталкивались в своей работе. Все приведенные ниже изображения были сгенерированы с помощью программных систем компьютерной графики, разработанных в ИПМ им. М.В.Келдыша РАН [1].

## 2. ПРИМЕНЕНИЕ РЕАЛИСТИЧНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

**Архитектура и ландшафтный дизайн.** Архитектура была одной из первых областей применения генерации реалистичных изображений виртуальных сцен. Это связано с относительной простотой виртуального представления архитектурных объектов в памяти, что в свою очередь снижает требования к ресурсам компьютера. При сильном упрощении здания могут быть представлены параллелепипедами, стены, этажные перекрытия – плоскостями. Практически отсутствуют криволинейные поверхности.

С помощью компьютерного моделирования заранее возможно определить и согласовать с заказчиком архитектурного проекта не только эстетичность интерьеров помещений и внешнего вида здания, что стало уже традиционным, но и следующие факторы:

1) В последние годы важным аспектом строительства любого здания является экономичность его системы освещения. Основываясь на точных расчетах освещения помещений дневным и солнечным светом, архитектор может варьировать положение и ориентацию здания относительно сторон горизонта и окружающих строений, расположение и размеры оконных проемов, лоджий и т.д. Основной целью при таком дизайне является максимальное использование естественного света (создаваемого солнцем и небом) для достижения комфортного освещения помещения при минимальных энергетических затратах на его искусственное освещение.

2) При проектировании рабочих и офисных помещений освещенности рабочих мест должны соответствовать существующим стандартам, в которых указаны не только минимально допустимые величины освещенности, но и такие параметры, как, например, доля прямого света от источника в поле видимости человека («комфортность» освещения). Для эффективной проверки соответствия стандартам рассчитанная освещенность может быть визуализирована в виде световой карты. Световая карта – это такое же реалистичное изображение виртуальной сцены, но только физические значения освещенности представлены в ней заданными цветами («псевдо-цветами»). Правильное задание соответствия значений освещения определенному цвету позволяет сразу увидеть соответствие разрабатываемого проекта стандартам. Пример такой световой карты представлен на рис. 1.



Рис. 1. Распределение освещенности, представленное световой картой.

**Автомобильная промышленность.** Алгоритмы реалистичной визуализации, используемые в автомобильной промышленности, значительно сложнее тех, что сначала были разработаны для архитектурных приложений. Основными дополнительными факторами здесь являются

- наличие большого числа криволинейных поверхностей, обычно представляемых в виде сплайнов в системах САПР;

- сложные оптические свойства поверхностей; для примера достаточно сравнить внешний вид автомобильной краски «металлик», цвет которой меняется в зависимости от направлений освещения и наблюдения, и стен здания, которые в большинстве случаев являются практически диффузными.

Однако и класс задач, в решении которых применяются алгоритмы компьютерной графики, в автомобильной промышленности значительно шире. Приведем некоторые из них.

1) Задача расчета освещения салона автомобиля является схожей с задачей расчета освещения интерьеров помещений. Здесь также важными факторами являются как эффективность освещения, так и соответствие освещенности принятым стандартам.

2) Важным направлением, получившим развитие в последние годы, стало моделирование и визуализация новых оптически сложных материалов, таких как многослойные краски со сложной микроструктурой (типа перламутровых и «металлик»). Разработанные программные средства позволяют моделировать и визуализировать краски, состоящие из плоскопараллельных однородных слоев, каждый из которых составлен из прозрачного лака и взвешенных в нем пигментных частиц и интерференционных чешуек.

На рис. 2 представлен автомобиль, окрашенный такой краской, при солнечном освещении. Цвет этих красок зависит от угла зрения и направления освещения. Он может резко меняться («переключаться») даже при плавном изменении этих углов. Светорассеивающие свойства таких красок не могут быть заданы скалярными коэффициентами, а требуют более сложного описания с помощью двунаправленных функций отражения света. Другим аспектом визуального восприятия краски является освещение, она выглядит различно утром и в середине дня, при солнечной или пасмурной погоде. Гораздо дешевле смоделировать на компьютере внешний вид краски и исследовать ее при различных условиях освещения (дневной, солнечный свет, искусственное освещение), чем произвести опытную партию краски и покрасить ею реальный автомобиль. В настоящее время такой подход к моделированию красок применяется не только в автомобильной промышленности, но и для окраски большого спектра других изделий (мобильные телефоны, бытовая техника и пр.)



Рис. 2. Автомобиль, окрашенный оптически сложной краской, при солнечном освещении.

Результаты моделирования красок оказались столь успешными, что позволили перейти к более сложной задаче моделирования и визуализации покрытий с высокой концентрацией пигментных частиц, например, при разработке новейших типов принтерных чернил. С точки зрения компьютерной графики задача визуализации принтерных чернил выглядит похожей на предыдущую. Но малые размеры частиц и их высокая концентрация полностью меняют вычислительные методы, применимые для данного случая. Вычислительная сложность связана не только с необходимостью использовать методы решения волновых уравнений для моделирования всего слоя, но и с последующим формированием внешнего вида чернил из полученного волнового решения.

3) Важным аспектом безопасности является отсутствие бликов и отражений элементов салона в стеклах автомобиля. На рис. 3 показан пример визуальной оценки нежелательных отражений, которые получаются при моделировании с заданными параметрами материалов и геометрии салона автомобиля.



Рис. 3. Визуальная оценка нежелательных отражений в боковом стекле автомобиля.

4) В современных условиях, когда автомобильный рынок перенасыщен, и каждая фирма вынуждена бороться за покупателя, модификация внешнего вида автомобиля становится практически ежегодной. Одним из наиболее выигрышных элементов являются фары. Поэтому использование инструментов компьютерной графики для разработки и оценки внешнего вида как включенных, так и выключенных фар, в дневное и ночное время позволяет существенно снизить затраты и ускорить разработку очередной модификации автомобиля. При моделировании фар также проверяется на соответствие стандартам направление и яркость получаемого светового луча. Аналогичным образом производится моделирование задних фонарей, стоп-сигналов и поворотных огней. При этом важным является правильная цветопередача красных и желтых фонарей или стекол лампочек.

**Авиационная промышленность.** Как и при визуализации автомобиля, в модели салона самолета мы сталкиваемся с большим числом криволинейных поверхностей, материалов и тканей со сложными оптическими свойствами, которые покрывают значительную часть элементов салона. Однако главной особенностью моделирования освещения салона самолета

является практически полное отсутствие прямого света. Правильно рассчитать освещение здесь возможно только с использованием алгоритмов глобального освещения.

По данным фирмы Boeing разработка и создание внутренней отделки пассажирского самолета составляют до 60% его стоимости. Во многих случаях фирма строит прототип салона в натуральную величину, показывает представителям авиакомпаний-заказчиков, и затем модифицирует в соответствии с замечаниями. И только после утверждения прототипа он будет реализован в воздушном лайнере. Компьютерное моделирование освещения и реалистичная визуализация салона позволяет существенно сократить затраты. На рис. 4 показано изображение салона самолета Airbus A-380, созданное дизайнерами еще во время его начальной разработки.

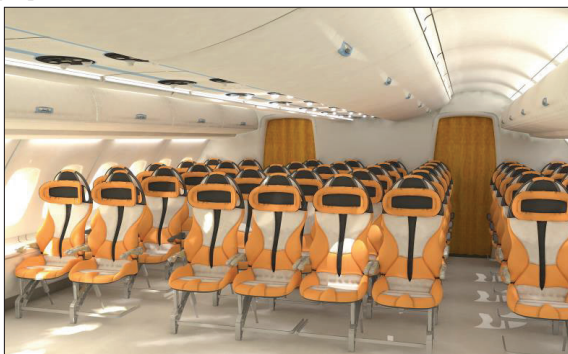


Рис. 4. Виртуальная модель компоновки и внутренней отделки салона самолета Airbus A-380.

Важным критерием проектирования кабины пилотов является хорошая читаемость приборов и устройств управления при различном освещении, которые можно проверить с помощью системы физически аккуратной, реалистичной визуализации.

Следует подчеркнуть, что все вышеперечисленные задачи можно решать, только если моделирование основано на физических законах распространения света и позволяет достичь приемлемой точности. Или, другими словами, если реалистичное изображение, сгенерированное компьютером по виртуальному описанию, будет соответствовать восприятию реальности человеком. Для решения этих задач мы использовали универсальную и достаточно эффективную технологию двунаправленной Монте-Карло трассировки лучей.

### 3. УЧАСТИЕ В ПРОЕКТЕ МКО ТС.3.33

МКО – Международная комиссия по освещению [2] – является наиболее авторитетной организацией, разрабатывающей и принимающей стандарты и технологии в области цвета и света. По заданию этой организации под руководством Ф. Маатаги были разработаны и в 2002 году опубликованы наборы аналитических тестов для программ моделирования освещения [3]. Всего было предложено 227 тестов.

Тесты были направлены на проверку того, насколько программы моделирования распространения света реально подчиняются законам оптики, в частности, для различных моделей естественного освещения. Тесты отдельно проверяли такие аспекты, как корректность задания источников света, корректное моделирование множественных переотражений и т.д. Особое внимание

было уделено сложной для корректного вычисления модели, когда внутреннее помещение освещается небесной полусферой через небольшое окно. Для этой модели корректные результаты в разумное время можно получить практически только двунаправленной Монте-Карло трассировкой лучей.

Программная система моделирования освещенности, разработанная в ИПМ, участвовала в проверке этими тестами вместе с такими известными продуктами как Dialux, Genelux, Lightscape, Radiance. Результаты независимого тестирования были опубликованы в [4], где наша программная система Inspiger показала в большинстве случаев результат не хуже или превосходящий конкурентов. Более половины тестов показали ошибку менее 1%, и только 2% тестов превысили «инженерно-приемлемую» ошибку 10%.

### 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Созданная технология расчета распространения света оказалась столь эффективной и точной, что позволила перейти к моделированию и инженерному проектированию сложных оптических светопроводящих и осветительных систем, таких как жидкокристаллические мониторы, приборные панели автомобилей, светодиоды и осветительные системы на их основе.

Растущие требования, предъявляемые к эргономичности и эффективности современной техники, заставляют производителей искать новые решения при проектировании оптических систем. Так для того чтобы добиться максимально равномерного и комфортного освещения экрана ЖК монитора или приборной панели, создаются сложные системы подсветки, в производстве которых используются высокотехнологичные светопроводящие элементы и устройства со сложными оптическими свойствами. Принцип работы таких устройств основан на эффекте полного внутреннего отражения. Для их моделирования практически невозможно использовать обычные детерминистические методы лучевого расчета распространения света, применяемые для расчета линзовых оптических систем. Здесь также наиболее эффективна Монте-Карло трассировка лучей.

Рассмотрим основные принципы проектирования осветительной части ЖК монитора. Свет, излучаемый люминисцентной лампой или светодиодами, поступает через входную грань в *светопроводящую пластину* (СПП) - основной оптический элемент системы (рис. 5).

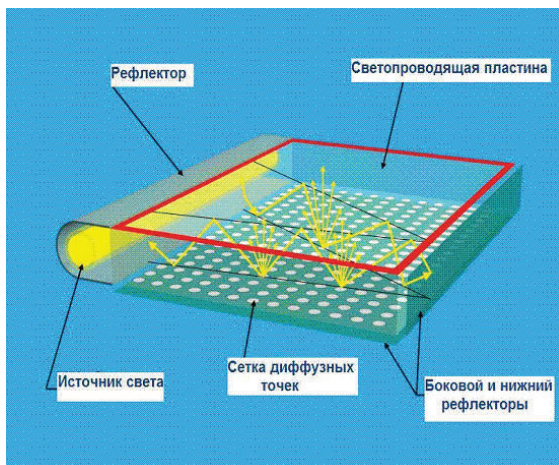


Рис. 5. Схема функционирования системы подсветки жидкокристаллического монитора.

Распространяясь внутри пластины, свет претерпевает многократные (сотни тысяч раз) полные внутренние отражения от ее поверхностей. На нижнюю сторону пластины нанесена сетка диффузных точек, либо микрорельеф, которые рассеивают падающий свет. Свет выходит из пластины через верхнюю выходную грань только в результате диффузного рассеяния от этих точек. Все остальные световые лучи падают на верхнюю поверхность пластины под углами, превышающими угол полного внутреннего отражения, что не дает возможности свету покинуть пластину. Таким образом, интенсивность выходящего светового потока в точке определяется плотностью распределения диффузной сетки (или микрорельефа) под ней и в некоторой ее окрестности.

Конечной целью моделирования подобных систем является расчет пространственного и углового распределений яркости света над выходной гранью устройства (помеченной красной рамкой на рис. 5). Задача заключается в том, чтобы сделать яркость на выходе максимально равномерной по всей выходной грани. Однако по мере удаления от входной грани пластины (у которой находятся лампа и рефлектор) световой поток ослабевает. Для компенсации этого эффекта плотность диффузной сетки (микрорельефа) должна постепенно возрастать слева направо.

Выше был описан простой пример моделирования системы подсветки. В реальности все обстоит гораздо сложнее. В частности, применение диффузных отражающих точек не эффективно за счет поглощения света на красителе. Типичный процесс проектирования подобных устройств включает в себя:

- проектирование источников света (светодиодов) и рефлекторов для получения максимального светового потока на входе в светопроводящую пластину (СПП);
- проектирование структуры микрогеометрии на нижней, рассеивающей, части СПП для получения пространственно равномерного распределения света над ее выходной (верхней) гранью;
- проектирование нескольких призматических слоев (BEF) для концентрации и усиления светового потока на выходе из СПП;
- проектирование диффузного и/или поляризационного фильтра (DBEF) для еще

большого усиления яркости экрана в определенном направлении.

Аналогичные принципы используются при проектировании таких устройств, как приборная доска автомобиля, кнопки с подсветкой и т.д. Формы СПП для разных устройств бывают достаточно сложными, и производится также моделирование их оптимальной формы. Дополнительно нами были успешно разработаны комплексы автоматического (без участия человека) дизайна таких оптических систем [5].

Светодиоды являются в последнее время наиболее эффективными и массовыми источниками света. Это порождает ряд задач их проектирования и использования. До сих пор актуальна задача создания белого светодиода, так как изначально он излучает свет в синем диапазоне. Одна из существующих технологий – использование флуоресцентного материала для коррекции цвета. При помощи моделирования можно добиться оптимальной концентрации флуоресцентного вещества. Пример такого дизайна приведен на рис. 6.

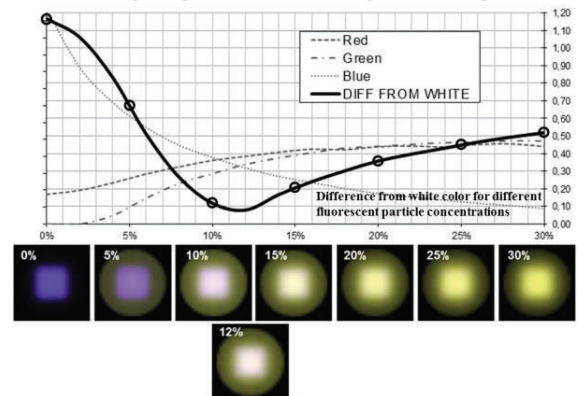


Рис. 6. Зависимость итогового цвета от концентрации флуоресцентного вещества.

При проектировании осветительных приборов на основе светодиодов дополнительной сложностью являются маленькая площадь и сила свечения одного светодиода. Для достижения требуемых значений освещенности часто необходимо использовать большие массивы светодиодов, вводить в проектируемые устройства такие оптические элементы, как концентрирующие линзы.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Бурное развитие промышленных технологий, появление многочисленных новых материалов с уникальными свойствами, прогресс в вычислительной технике, наблюдаемые в последнее десятилетие, существенно изменили и дополнили классическое понимание компьютерной графики как эффективного средства взаимодействия между человеком и вычислительной машиной, построенного на основе визуальных образов. Технологии компьютерной графики, ранее применявшиеся при построении изображений, оказались широко востребованными в компьютерном моделировании и инженерном проектировании высокотехнологичных промышленных изделий, разработке энергоэффективных осветительных устройств, киноиндустрии и других областях. При этом требования к реалистичности изображений, их физической достоверности, скорости генерации, точности вычислений значительно возросли.

Работа поддержана грантами РФФИ № 11-01-00870, 12-01-00560, 13-01-00454, а также фирмой Integra Inc.

## 6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов. Машинная графика в задачах автоматизированного проектирования // «Информационные технологии в проектировании и производстве», № 1, 2006, с. 64-73.
- [2] CIE – International Commission on Illumination, <http://www.cie.co.at/cie/index.html>
- [3] F. Maamari. TC.3.33. List of proposed test cases // ENTPE – France, 2002.
- [4] F. Maamari, M. Fontoynt, M. Hirata, J. Koster, C. Marty, A. Transgrassoulis. Reliable Datasets for Lighting Programs Validation, Benchmark Results // Proceedings of CISBAT 2003, EPFL Lausanne, 2003, pp. 241-246.
- [5] D.Zhdanov, A. Garbul, V. Mayorov, V.Sokolov, I.Potemin, T.Hyodo, A.Voloboy, V.Galaktionov. Automatic Design of Illumination Systems // Optical Review, vol. 20, no.2, 2013, p.155-159.

## Abstract

The paper demonstrates that computer graphics is not only the area of research and development of algorithms but also useful and productive tool for high technology products development. The examples of practical tasks which were solved with the aid of methods and algorithms of realistic physically accurate computer graphics are presented.

**Keywords:** *realistic rendering software, simulation of optical systems, Monte Carlo ray tracing*

## Authors:

Алексей Геннадьевич Волобой, д.ф.-м.н., с.н.с.,  
E-mail: [voloboy@gin.keldysh.ru](mailto:voloboy@gin.keldysh.ru)

Владимир Александрович Галактионов, д.ф.-м.н., проф.,  
зав. отделом Компьютерной графики и вычислительной оптики, E-mail: [vlgal@gin.keldysh.ru](mailto:vlgal@gin.keldysh.ru)