

Лекция 2.3. Модели освещения

Свет

Луч света, испущенный неким источником в пространство обладает рядом изначальных характеристик.

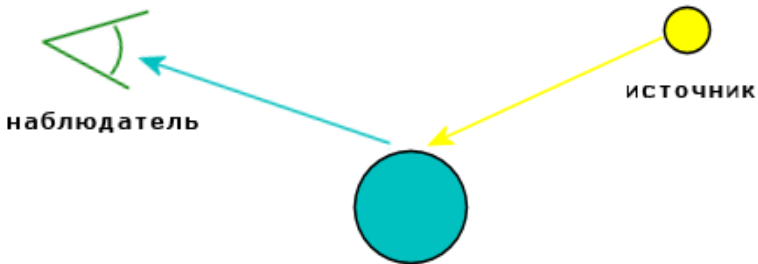
Проходя через среду, луч света может менять свои характеристики.

Сталкиваясь с некоторым телом, так же происходит изменение характеристик луча.

Вновь проходя через среду, луч может достигнуть глаза наблюдателя. Часть характеристик этого луча будут восприняты человеком и преобразованы в визуальную информацию.

Природа света аддитивна. Если некоторая точка пространства одновременно освещается несколькими источниками, то конечный уровень интенсивности в данной точке представляет собой сумму интенсивностей для каждого из источников.

$$I = I_0 + I_1 + I_2 + \dots I_n$$



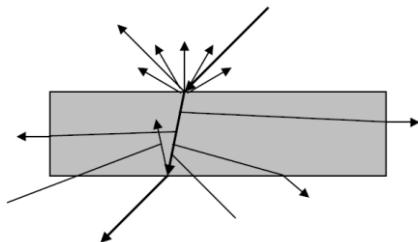
При столкновении луча света с некоторым телом свет разделяется на:

- Поглощенный (Absorbed).
- Отраженный свет (Reflected).
- Преломленный свет (Refracted)

Кроме того, возможны случаи многократного внутреннего преломления и отражения. Причина подобного поведения – состав материала, его структура, и разница в плотностях на границе между материалом и средой.

Любой луч можно рассматривать как энергию, тогда:

падающий свет = поглощенный свет + отраженный свет + преломленный свет



Отраженный свет



Отраженный свет так же можно подразделить на три категории:

- Diffuse (рассеянный).
- Glossy (блик).
- Specular (собственно, отраженный).

Зачастую, в понятие блика включают и собственно отраженный свет. В таком случае, блик стоит воспринимать, как рассеивание собственно отраженного света.

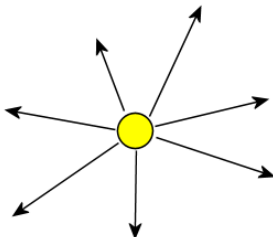
Источники света

Все источники света по своей природе с точки зрения компьютерной графики можно подразделить на три типа:

- Точечный свет
- Направленный свет
- Фоновый свет

Для каждого из этих типов источников основной характеристикой является световой поток. С точки зрения компьютерной графики эта характеристика может быть выражена через **цвет** и **интенсивность**.

Точечный свет



Точечный свет (**Point Light** или **Omni**) – излучает свет радиально во всех направлениях из одной и той же точки пространства. В общем случае характеризуется параметрами:

- Положением в пространстве
- Коэффициентом падения яркости от расстояния (**Falloff**)

Для определения направления конкретного луча, необходимо знать координату точки в пространстве, в которую этот луч направлен.

Направленный свет

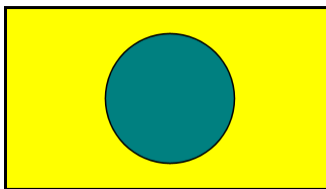


Направленный свет (**Directional**) – свет максимально удаленного источника. Все лучи принимаются параллельными.

Основной характеристикой является направление лучей.

Падения интенсивности луча не происходит.

Фоновый свет



Фоновый свет (**Ambient**) – не имеет ни положения в пространстве, ни направления.

Единственная характеристика – световой поток, который можно варьировать в пространстве. При этом, бывает очень трудно описать подобную функцию.

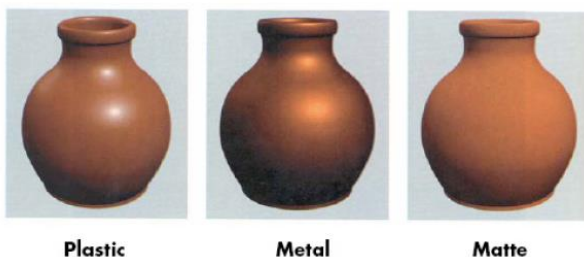
Классификация материалов

Каждый материал обладает уникальными свойствами с точки зрения взаимодействия со световым лучом.

Однако вместо того, чтобы выводить закономерности подобного взаимодействия в каждом частном случае, намного эффективнее пойти на некоторое упрощения модели и выделить классы материалов.

Внутри каждого из таких классов посредством численных характеристик можно отразить особенности каждого частного случая.

Непроницаемые материалы (Opaque)



Основное свойство непроницаемых материалов – свет не преломляется их поверхностью. Практически весь свет уходит на рассеивание и блик.

Выделяют два основных типа – **диэлектрики** и **металлы**.

Основное отличие заключается в том, что у диэлектриков цвет блика совпадает с цветом источника, в то время как металлы изменяют его.

Все металлы принято выделять одной большой группой, в то время как диэлектрики подразделяются на подвиды.

Классификация диэлектриков

- Пластик (Plastic)

Наиболее популярный из всех типов. Обладает постоянными свойствами. Имеет блик цвета источника.

- Матовые материалы (Matte)

Особый тип непроницаемых материалов. У них отсутствует блик.

- Волосы и мех (Hair & Fur)

Материал состоит из множества одинаковых элементов, каждый из которых может быть описан как пластик.

- Растительность (Vegetation)

По своим свойствам напоминает пластик, однако, свойства варьируются по поверхности.

Кроме этого, имеются и другие виды диэлектриков.

Рассеивающие материалы (Translucent)

Основное отличие от непроницаемых материалов – свет проникает внутрь и там рассеивается, вновь выходя наружу. Подобный эффект получил название **subsurface scattering** (подповерхностное рассеивание).

В качестве примеров подобных материалов можно привести:

- Кожу
- Молоко
- Асбест
- Мрамор

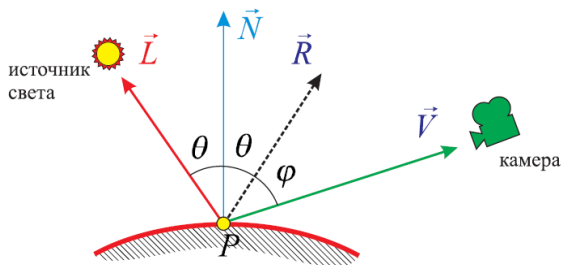
Прозрачные материалы (Transparent)

Основные свойства – проницаемость и отражение. В общем случае подобные поверхности не поглощают света.

Примеры материалов – стекло и вода.



Модель



P - рассматриваемая точка;

N - нормаль к поверхности изображаемого объекта в точке P;

L - вектор, проведенный из точки P в источник света (луч света);

V - вектор, проведенный из точки P в «точку зрения» камеры;

θ - угол между L и N, φ - угол между R и V.

$$\vec{R} = 2 \cdot (\vec{N} \cdot \vec{L}) \cdot \vec{N} - \vec{L} \quad \text{- отраженный луч света (отражение L относительно N);}$$

Освещенность произвольно взятой точки P, появившуюся из-за источника света, излучающего во все стороны (Omnilight) в общем случае будем вычислять по уравнению Фонга:

$$I = K_{\text{фона}} + I_{\text{света}} (K_{\text{дифф.}} \cos \theta + K_{\text{спектр.}} \cos^2 \varphi), \text{ где}$$

Кфона - коэффициент фоновой интенсивности (характеристика окружающей среды);

Кдифф. - $[0...1]$ коэффициент рассеивания (диффузного отражения), зависящий от материала поверхности и длины волны;

Кспектр. - $[0...1]$ коэффициент отражения (характеристика поверхности), вообще кривая функции отражения;

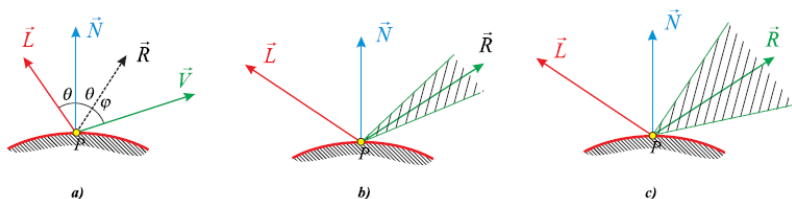
ρ - коэффициент вида отражения (характеристика грубости поверхности, при идеальном зеркале $\rho = \infty$, а при грубой поверхности $\rho \approx 1$);

Исвета - интенсивность источника света;

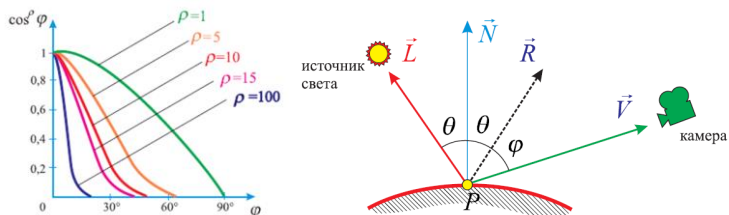
I - суммарная освещенность (интенсивность отраженного света).

Освещенность складывается из фонового уровня освещенности, рассеянного (по всем направлениям, а значит, и по направлению камеры) в этой точке света от источника и отраженного (тоже в сторону камеры) света от источника.

Зависимости отраженного луча от типа поверхности показаны на рисунках

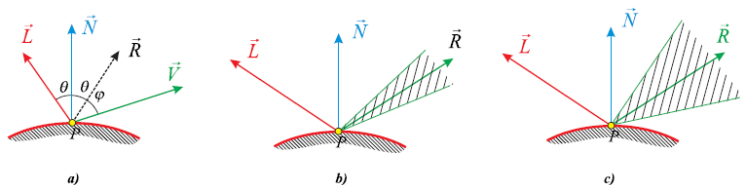


Зависимость отраженного луча от типа поверхности: зеркальное отражение (а), отражение от блестящей поверхности (b), отражение от тусклой поверхности (с)



ρ - коэффициент вида отражения (характеристика грубости поверхности, при идеальном зеркале $\rho = \infty$, а при грубой поверхности $\rho \approx 1$);

Зависимость $\cos \varphi$ в степени ρ от φ



С учетом расстояния формула будет выглядеть следующим образом:

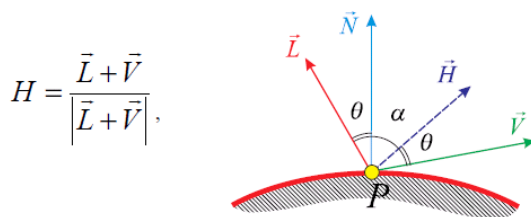
$$I = K_{\text{фона}} + \frac{I_{\text{света}}}{d + K} \cdot (K_{\text{дифф.}} \cos \theta + K_{\text{спектр.}} \cos^{\rho} \varphi), \text{ где}$$

d — расстояние от центра проекции до объекта, при параллельной проекции;

d — расстояние от объекта, ближайшего к наблюдателю;

K — произвольная константа.

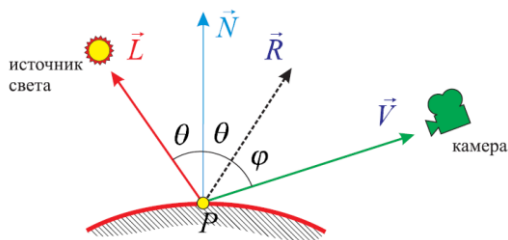
Блинн сформулировал формулу отраженного света с использование промежуточного вектора \vec{H}



$$H = \frac{\vec{L} + \vec{V}}{|\vec{L} + \vec{V}|},$$

$$I = K_{\text{фона}} + I_{\text{света}} (K_{\text{дифф.}} \cos \theta + K_{\text{спектр.}} \cos^{\rho} \alpha), \quad \text{где } \alpha \text{ — угол между } H \text{ и } N.$$

Закон освещенности Ламберта

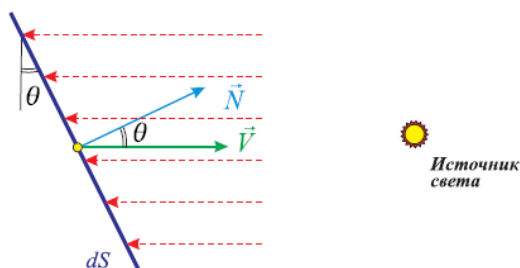


Падающий на поверхность свет рассеивается во все стороны с одинаковой интенсивностью.

Освещенность поверхности прямо пропорциональна доле самой поверхности, видимой источником.

Выражаясь математическим языком, освещенность в точке прямо пропорциональна косинусу угла между нормалью поверхности в данной точке и вектором направления на источник света.

Подобный закон позволяет вычислять интенсивность рассеянного поверхностью света. Так же с его помощью можно рассчитать и интенсивность блика, если в вычислениях использовать угол между отраженным светом и направлением на наблюдателя.



Делаются такие предположения:

1. V не сильно зависит от P , т.о. V принимается постоянным для всей грани.

2. L не сильно зависит от P , т.о. L принимается постоянным для всей грани.

3. $K_{\text{спектр.}} = 0$ (то есть грань не отражает свет, а только рассеивает).

Нормаль к объекту N равна нормали n к грани в любой точке грани P .

В этом случае формула принимает вид:

$$I = K_{\text{фона}} + I_{\text{света}} K_{\text{дифф.}} \cos \theta, \quad \text{где}$$

$\theta \in [-\pi/2 \dots \pi/2]$ - угол между направлением света и нормалью к поверхности.

Причем в этой формуле, по предположениям, нет величин, зависящих от P . Так что освещенность равна константе для всей грани, то есть все точки грани освещены одинаково. Тогда достаточно посчитать ее лишь один раз на грань.

Методы закраски

Предположим, имеется некоторая модель освещения, позволяющая рассчитать освещенность в некоторой точке.

Для расчета освещенности необходимы:

- направление на источник света,
- направление на наблюдателя,
- направление нормали поверхности,
- направление отраженного луча.

Однако сама модель освещения еще не дает ответа на вопрос каким образом можно закрасить полигон в пространстве.

Метод плоской закраски (Flat Shading)

Модель с плоским закрашиванием заключается в равномерном однородном закрашивании каждого многоугольника одним цветом (обычная заливка). В результате объект предстает как множество плоских граней.

Этот метод добавляет немного реалистичности в изображение сцены, так как яркость закраски каждой поверхности зависит, некоторым образом, от угла падения света на нее.

В начале процесса закраски вычисляем нормаль для каждого многоугольника. Вектор нормали можно представлять себе в виде стрелки, указывающей направление лицевой поверхности грани.

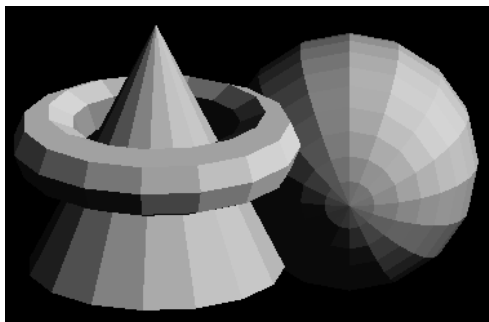


Дальше вычисляем угол между нормалью каждого многоугольника и направлением луча, выпущенного некоторым абстрактным источником света. Тем многоугольникам, нормаль которых параллельна направлению света (т.е. тем плоскостям, которые непосредственно «смотрят» лицевой частью на источник света), приписывается наибольшая интенсивность света, а те грани, чья нормаль составляет 90° и больше с направлением света (т.е. плоскости, которые не «видят» источника) рисуются черными. Говоря математическим языком, яркость поверхности пропорциональна косинусу угла. Таким образом, самая большая интенсивность цвета будет только у поверхностей, нормаль которых образует нулевой угол с направлением луча, освещающего сцену.

Процесс закраски повторяется для каждого многоугольника и применяется метод Z-буфера или другой метод удаления невидимых поверхностей, чтобы убрать с изображения многоугольники (или их части), закрытые другими многоугольниками. В результате получим плоско закрашенное изображение.

Простейший случай применения закона Ламберта. Каждый полигон описывается плоской гранью, а его освещенность по поверхности считается постоянной.

Недостаток – невозможность корректного отображения гладких поверхностей.



Закраска Гуро (Gouraud Shading)

Метод Гуро основывается на определении освещенности грани в ее вершинах с последующей интерполяцией получившихся величин на всю грань.

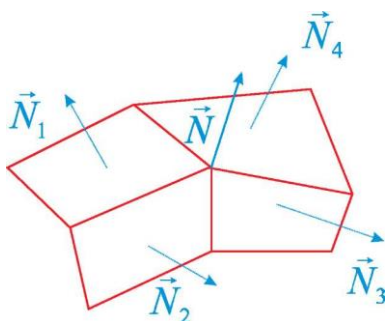
В отличие от плоской закрашки, при которой все точки одного многоугольника рисуются одним цветом, в методе Гуро интенсивность освещения, а, следовательно, и цвет каждой точки, меняется вдоль поверхности многоугольника. Здесь опять рассматривается простая полигональная модель.



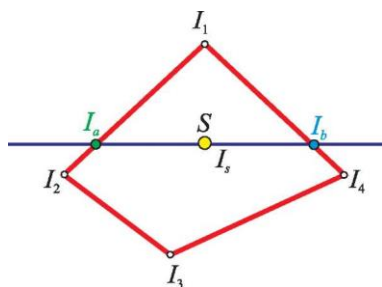
Сначала вычисляем нормали для каждой вершины модели. (Вершиной здесь называется точка, где соединяются многоугольники.) Нормаль вершины считается как среднее между нормальями всех многоугольников, пересекающихся в данной вершине

Моделью освещения (функцией закрашки) будем называть функцию, зависящую от вектора нормали в данной точке, положения источника света и вектора наблюдения. Функция закрашки применяется в каждой вершине для расчета интенсивности.

Для данного многоугольника интенсивность освещения в каждой вершине считается так же, как и для всей поверхности при плоской закрашке. Интенсивность освещения в вершине пропорциональна косинусу угла между нормалью в вершине и направлением падающего света.



Проведем через произвольную точку S выпуклого четырехугольника горизонтальную прямую. Освещенность I_s в точке S вычисляется по интенсивностям I_a и I_b в точках пересечения этой прямой со сторонами четырехугольника, а I_a и I_b интерполируются по интенсивностям в соответствующих вершинах:



$$I_a = \frac{I_1(y_s - y_2) + I_2(y_1 - y_s)}{y_1 - y_2}$$

$$I_b = \frac{I_1(y_s - y_4) + I_4(y_1 - y_s)}{y_1 - y_4}$$

$$I_s = \frac{I_a(y_b - y_s) + I_b(y_s - y_a)}{y_b - y_a}$$

Проводя этот процесс для каждого многоугольника и удаляя невидимые поверхности, получим изображение, закрашенное методом

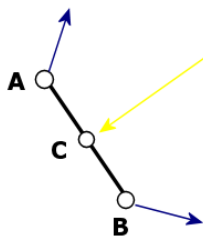
Гуро. Эта закрашка более плавная, чем плоская, потому что сливаются вместе линии, где пересекаются многоугольники. Единственным видимым доказательством того, что изображение получено из полигональной модели, является немного изломанный контур изображения.

Недостатки метода Гуро:

1. С помощью метода Гуро можно изображать только матовые поверхности, не имеющие зеркальных бликов (т.к. блик будет размазываться по поверхности и скроется). Действительно, в случае, когда блик расположен внутри грани и не доходит до вершин, зеркальная составляющая в вершинах равна нулю и, следовательно, блик не появится при интерполяции.

2. У метода Гуро есть еще один недостаток. Дело в том, что возникает классический оптический эффект: на границах четырехугольников человеческий глаз усиливает переходы и границы воспринимаются как светлые линии (это происходит из-за разрыва производной).

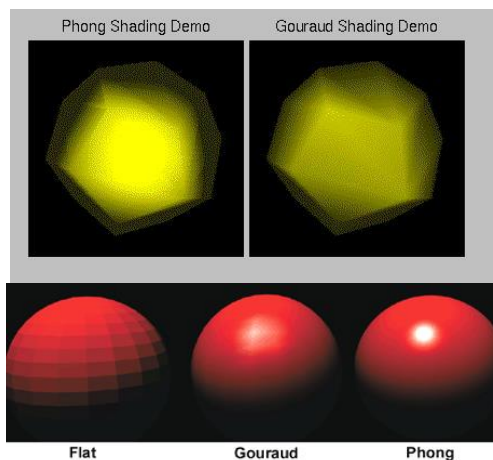
Желание устранить эти недостатки приводит нас к методу Фонга



В каждой из вершин сложной фигуры вычисляется нормаль, с ее помощью освещается каждая вершина.

Затем, в каждой точке поверхности посредством интерполяции находится соответствующий ей цвет (используется сканирующая линия).

Недостаток – некорректное отображение бликов. В точке С должен быть блик. Однако ее освещенность вычисляется как линейная интерполяция освещенностей А и В)



Закраска Фонга (Phong Shading)

В методе Фонга зеркальные блики выглядят довольно правдоподобно и почти (но не совсем) устранен оптический эффект. Как и метод Гуро, метод Фонга также опирается на интерполирование, но интерполируются не интенсивности, а нормали, и модель освещения (функция закраски) применяется к каждой точке, используя интерполированную нормаль N .



Идея заимствована у Гуро, однако с модификацией. В каждой точки поверхности вычисляется не интерполированный цвет, а новая нормаль. С ее помощью и производится освещение.

Явный недостаток – достаточно сложные расчеты для каждой точки.

Сначала вычисляем нормали для каждой вершины модели. Нормаль вершины считается как среднее между нормальными всех многоугольников, пересекающихся в данной вершине.

Нормали ребер и внутренние нормали многоугольника находятся с помощью интерполяции нормалей вершин. При этом получается поле псевдонормалей.

Для данного многоугольника интенсивность освещения в каждой точке считается так же, как и для всей поверхности при плоской закраске. Интенсивность освещения в точке пропорциональна косинусу угла между нормалью в точке и направлением падающего света.

Изображения, полученные методом Фонга, получаются более реалистичными, но этот метод требует гораздо большего объема вычислений: во-первых, интерполируются три векторные компоненты, а во-вторых, высчитывается интенсивность в каждой точке. Это привело к возникновению различных технологий ускорения этого метода, которые можно разделить на численные и геометрические. Численные оптимизации, разработанные Бишопом и Даффом, уменьшают количество арифметических и алгебраических операций, а геометрический подход, предложенный Бергманом и Харрисоном, основан на определении мест появления бликов.

Недостатки метода Фонга:

Несмотря на то, что метод Фонга позволяет получать блики на поверхности и снижает видимость границ граней, у него все же есть недостатки.

1. Работая в плоскости экрана, мы проводим интерполяцию с одинаковыми приращениями, хотя правильнее было бы учитывать перспективное представление граней и использовать разные приращения .

2. Возникают проблемы при анимации. Дело в том, что в определенный момент времени при повороте грани нормаль в одной и той же точке P начинает интерполироваться по нормальям другой тройки вершин, что, естественно, иногда бывает очень заметно.

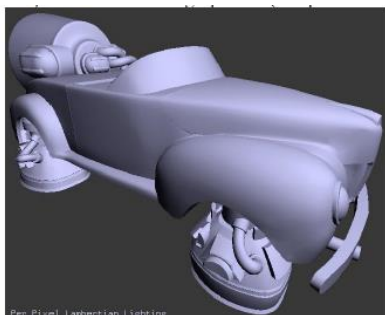
3. При разбивке поверхности на четырехугольники надо учитывать, что, если точка является вершиной хотя бы одного четырехугольника, то она также должна быть вершиной всех четырехугольников, которым она принадлежит. Это может привести к нежелательным визуальным эффектам.

4. Если нормали к смежным четырехугольникам очень быстро меняют направление, мы можем получить неправильную закраску.

Методы [Гуро](#) и [Фонга](#) хороши тем, что они просты и с их помощью можно получить довольно хорошую закраску, но поверхности получаются неинтересными и какими-то безжизненными. Текстуры помогут нам избежать этого.

Модель освещения Ламберта

$$I = k_a + k_d f_{att} (N \cdot L)$$



Изобретена более столетия назад, однако, все еще эффективна. Опирирует лишь рассеиванием света.

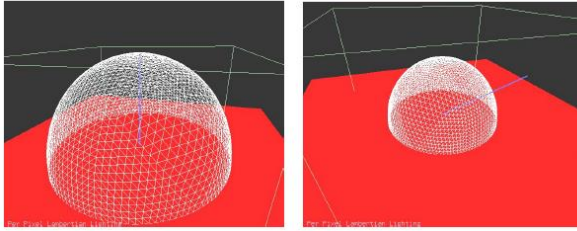
N – нормаль.

L – Направление на источник света.

K_d – коэффициент рассеивания

K_a – уровень фонового освещения

Модель словно сделана из грубого пластика.



Модель освещения Фонга

$$I = k_a + k_d f_{att}(N \cdot L) + k_s f_{att}(E \cdot R)^n$$

Использует отражение.

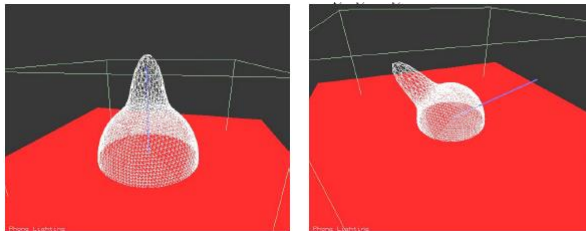
K_s – коэффициент отражения (яркость блика)

E – направление на наблюдателя

R – отраженный луч

n – интенсивность блика. Чем выше n , тем меньше блик

Идеальный материал – пластик



Модель Кука-Торранса

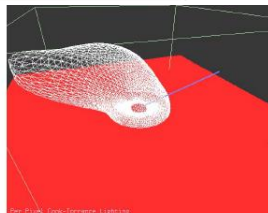
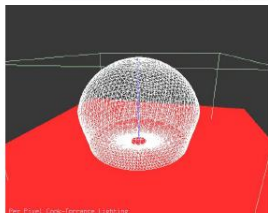
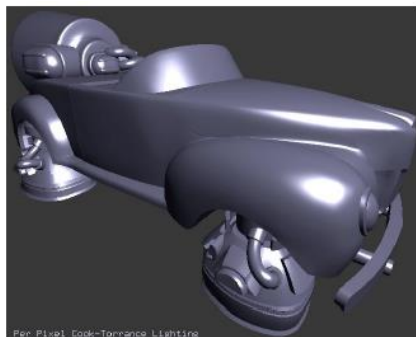
Идеальный случай – металлы.

Поверхность – совокупность множества мелких граней

$$I = k_a + k_d \rho (L \cdot N) + k_s \frac{DGF_\lambda(\theta_i)}{\pi(E \cdot N)}$$

$$\rho = k_s f_{att} \frac{DGF_\lambda(\theta_i)}{\pi(L \cdot N)(E \cdot N)}$$

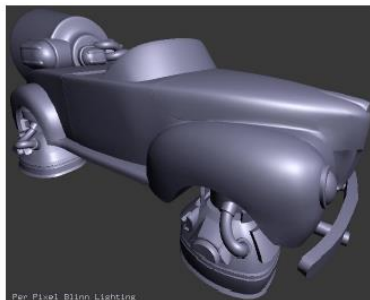
$$D = \frac{e^{-\left(\frac{\tan(\beta)}{m}\right)^2}}{4m^2 \cos^4(\beta)}$$



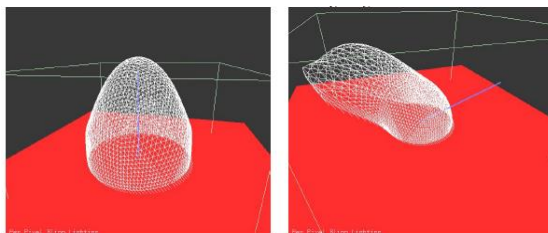
Модель Блинна

$$I = k_s f_{att} \frac{DGF_\lambda(\theta_i)}{(E \cdot N)}$$

$$D = \left(\frac{c^2}{(N \cdot H)^2 (c^2 - 1) + 1} \right)^2$$



Первая попытка учесть положение наблюдателя. Основана на базе работы, проведенной в 1967 году Торрансом и Спарроу



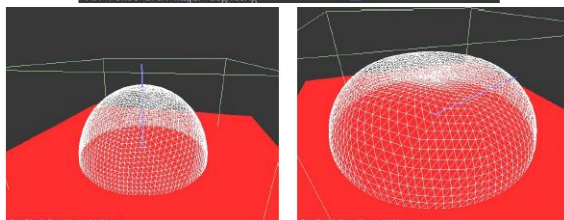
Модель Oren-Nayar

Используется при имитации грубых поверхностей без блика. В полном варианте учитывает возможность подповерхностного рассеивания.

$$I = k_d f_{att} \frac{\rho}{\pi} E_0 \cos(\theta_i) (A + B(\max[0, \cos(\phi_r - \phi_i)] \sin(\alpha) \tan(\beta)))$$

$$A = 1.0 - 0.5 \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.33}$$

$$B = 0.45 \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.09}$$



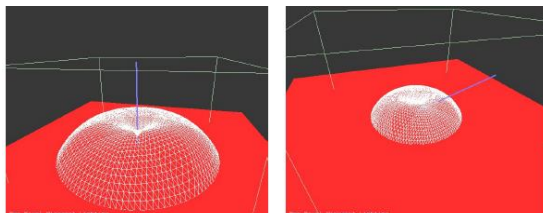
Модель Minnaert'a

Специфичная модель. Способна имитировать определенные свойства тканей, создающих затенение в местах, на которых в других моделях был бы блик.

Идеальный материал – бархат.



$$I = k_d f_{att} (N \cdot L)^k (N \cdot E)^{1-k}$$



Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF)

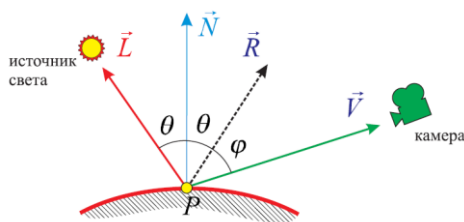
Функция Двухнаправленного Распределения Отражаемости.

Основное назначение – имитация анизотропных материалов.

Изотропными считаются материалы, проявляющие одни и те же визуальные свойства при вращении поверхности вокруг нормали (все прежние модели освещения описывают изотропные материалы).

Если при вращении визуальные свойства поверхности меняются, такие материалы считаются анизотропными.

В качестве примера анизотропных материалов можно привести ржавый металл.



Классический подход неприменим для анизотропных материалов.

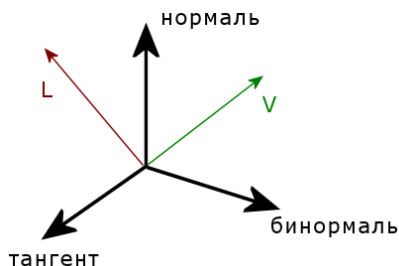
Действительно, с одной стороны, при вращении системы LRV вокруг нормали не происходит какого-либо изменения свойств поверхности, так как все необходимые углы сохраняют свои величины.

С другой стороны, при изменении направления вектора V, освещенность точки с учетом рассеивания света остается постоянной, а при вращении V вокруг R интенсивность блика так же не меняется (даже не смотря на то, что изменяется угол между L и V).

В BRDF для вычисления интенсивности в точке используют не векторное представление направлений L и V, а их представление в полярных координатах. В таком случае, кроме вектора нормали поверхности используется вектор тангента, позволяющий такие координаты определить.

Вектор тангента всегда перпендикулярен нормали. Пара векторов нормаль-тангент позволяет перейти от векторного представления к полярным координатам однозначным образом.

Для повышения эффективности расчетов к системе нормаль-тангент часто добавляют третий вектор – бинормаль. Эти три вектора составляют ортогональную систему координат, называемую тангентным пространством.



В таком случае, при фиксированном тангентном пространстве в точке, освещенность является функцией шести параметров:

$$\text{BRDF}_\lambda(\theta_i, \phi_i, \theta_o, \phi_o, u, v)$$

где u , v выражают зависимость свойств от координат на поверхности.

Если визуальные свойства не зависят от таких координат, то BRDF называют инвариантной к позиции и описывают как функцию 4-х параметров:

$$\text{BRDF}_\lambda(\theta_i, \phi_i, \theta_o, \phi_o)$$

Здесь:

$$\theta_i, \phi_i$$

координаты L вектора

$$\theta_o, \phi_o$$

координаты V вектора

Однако, вышеперечисленных параметров для описания материалов недостаточно (в этом случае все материалы были бы однотипными). Поэтому, в формулу добавляются дополнительные коэффициенты, характеризующие свойства, присущие тому, или иному материалу.

Количество коэффициентов, равно как и их величины, зависят от вида функции, выбранной для приближения.

На настоящий момент не существует единой функции, описывающей BRDF. Работы по исследованию свойств материалов еще не закончены. Не смотря на это, Известны несколько функций, способных приближать достаточно большое количество материалов.

Самыми распространенными из них являются приближения [Фонга](#) и [Oren-Nayar'a](#).