

Модель Блинна-Фонга

Быковских Дмитрий Александрович

02.12.2023

Модель освещения Фонга является простой, популярной и широко известной в компьютерной графике.
Описание модели было представлено в следующей статье
Bui Tuong Phong "Illumination for Computer Generated Pictures" University of Utah (1975 г.)

В основе модели освещения Блинна-Фонга лежит алгоритм приближенного расчета интенсивности света на поверхности объектов. Эта модель была предложена в 1977 году Блинном и Фонгом. Один из вариантов рабочей формулы:

$$I = I_a k_a + \sum_{j=1}^m \frac{I_{l_j}}{d + k} \left[k_d (n_j \cdot L_j) + k_s (R_j \cdot v)^n \right]$$

Комбинация этих компонентов позволяет создавать более реалистичные изображения трехмерных объектов с учетом их взаимодействия с источниками света.

Источники света (ИС)

ИС — любой объект, излучающий энергию.

Типы источников света:

- Источники направленного света;
- Точечные ИС;
- Прожекторы.

2023-12-27

Модель Блинна-Фонга

└ Источники света (ИС)

Источники света (ИС)

ИС — любой объект, излучающий энергию.
Типы источников света:
• Источники направленного света;
• Точечные ИС;
• Прожекторы.

Интенсивность излучения

Интенсивность излучения - это физическая величина, характеризующая мощность электромагнитного излучения (например, света) в определенном направлении от источника.

Она измеряется в ваттах на квадратный метр ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

Математически интенсивность излучения (I) может быть выражена с использованием формулы:

$$I = \frac{P}{A},$$

где P — мощность излучения (в ваттах), A — площадь, через которую проходит излучение (в м^2).

Модель Блинна-Фонга

Интенсивность излучения

Значение для каждой компоненты цвета считается независимо, т.е.

$$I = (I_r, I_g, I_b).$$

Суммарное освещение

$$I = k_e + k_a I_a + \sum_j I_j,$$

где k_e — способность материала излучать свет; $k_a I_a$ — глобальную фоновую освещенность сцены; I_j — вклад вносимый j -м ИС.

Интенсивность излучения

Интенсивность излучения - это физическая величина, характеризующая мощность электромагнитного излучения (например, света) в определенном направлении от источника. Она измеряется в ваттах на квадратный метр ($\text{Вт}/\text{м}^2$). Математически интенсивность излучения (I) может быть выражена с использованием формулы:

$$I = \frac{P}{A},$$

где P — мощность излучения (в ваттах), A — площадь, через которую проходит излучение (в м^2).

Источники направленного света

Направленные световые источники (Directional Lights): Это источники света, которые моделируют бесконечно удаленный источник света, такой как солнце. Лучи света параллельны друг другу и идут в определенном направлении. Они используются для создания резких теней и подчеркивания форм объектов.

2023-12-27

Модель Блинна-Фонга

└ Источники направленного света

Источники направленного света

Направленные световые источники (Directional Lights): Это источники света, которые моделируют бесконечно удаленный источник света, такой как солнце. Лучи света параллельны друг другу и идут в определенном направлении. Они используются для создания резких теней и подчеркивания форм объектов.

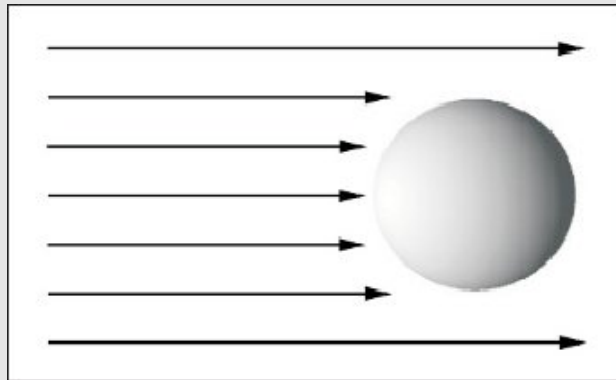


Рис. 1: Источник направленного света

Спот-свет (Spotlights): Эти источники света создают конус света, направленный в определенном направлении. Они эффективны для выделения конкретных объектов или областей в сцене. Спот-свет может имитировать направленные лучи фар автомобилей или прожекторы на сцене.

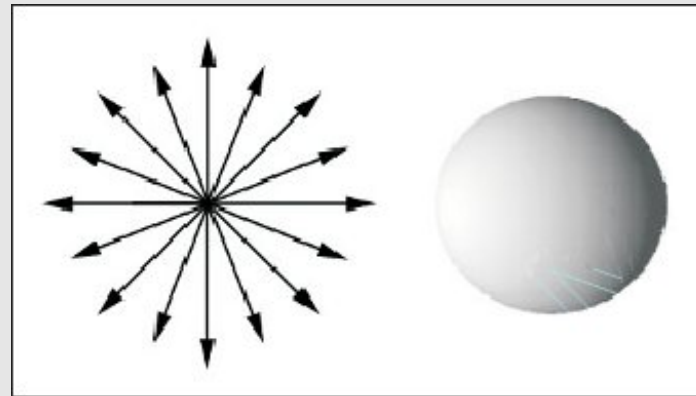


Рис. 2: Точечный ИС

Амплитуда затухания

Затухание (Attenuation): Учитывает затухание света с увеличением расстояния между источником света и поверхностью.

Чем дальше расположен объект от ИС, тем слабее интенсивность света на поверхности этого объекта.

Амплитуда затухания определяется функцией радиального затухания:

$$f(d_l) \sim \frac{1}{d_l^2},$$

где d_l — расстояние от объекта до ИС.

Но на практике применяют следующую функцию

$$f(d_l) = \begin{cases} \frac{1}{a_0 + a_1 d_l + a_2 d_l^2}, & \text{для локальных ИС} \\ 1, & \text{для бесконечно-удаленных ИС} \end{cases}$$

Модель Блинна-Фонга

└ Амплитуда затухания

Затухание (Attenuation): Учитывает затухание света с увеличением расстояния между источником света и поверхностью. Чем дальше расположен объект от ИС, тем слабее интенсивность света на поверхности этого объекта.

$$f(d) \sim \frac{1}{d_j^{2\gamma}},$$

где d_j — расстояние от объекта до ИС

Но на практике применяют следующую функцию

$$f(d_i) = \begin{cases} \frac{1}{a_0 + a_1 d_i + a_2 d_i^2}, & \text{для локальных ИС} \\ 1, & \text{для бесконечно-удаленных ИС} \end{cases}$$

Прожекторы (Projectors): Прожекторы в компьютерной графике используются для проецирования текстур или изображений на поверхности объектов в сцене. Они также могут быть настроены на создание направленного света в определенных направлениях.

$$f(\phi) = \left[\frac{(v_o, v_l)}{|v_o||v_l|} \right]^{a_l},$$

где $0 \leq \phi \leq \theta$.

└ Прожекторы

2023-12-27

Прожекторы (Projectors): Прожекторы в компьютерной графике используются для проецирования текстур или изображений на поверхности объектов в сцене. Они также могут быть настроены на создание направленного света в определенных направлениях.

$$f(\phi) = \left[\frac{(v_o, v_l)}{|v_o||v_l|} \right]^{a_l},$$

где $0 \leq \phi \leq \theta$.

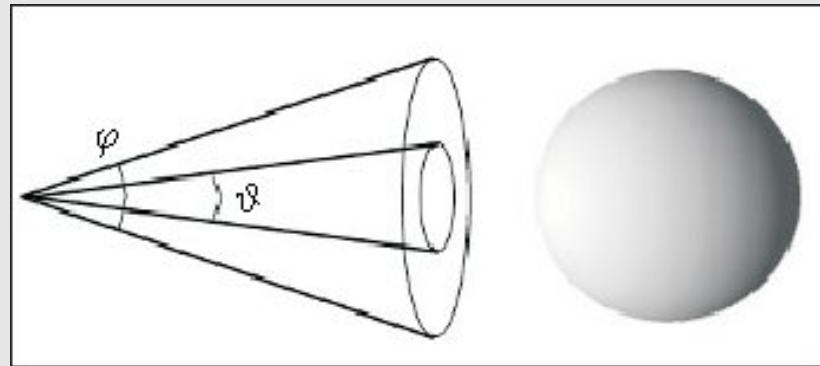


Рис. 3: Прожекторы

Интенсивность углового затухания

Угловое затухание интенсивности — явление, при котором интенсивность света затухает по мере увеличения угла между направлением, из которого свет падает, и нормалью к поверхности. Математически угловое затухание интенсивности часто выражается с использованием косинуса угла между направлением света и нормалью к поверхности. Если ϕ — угол между направлением света и нормалью, то угловое затухание может быть выражено следующим образом:

$$f(\phi) = \cos^{a_l} \phi$$

Здесь представляет собой коэффициент углового затухания, который уменьшает интенсивность света по мере увеличения угла. Когда свет падает под прямым углом (угол), угловое затухание равно 1, и свет не затухает. При увеличении угла, значение косинуса уменьшается, что приводит к уменьшению интенсивности света.

Интенсивность углового затухания

Угловое затухание интенсивности — явление, при котором интенсивность света затухает по мере увеличения угла между направлением, из которого свет падает, и нормалью к поверхности. Математически угловое затухание интенсивности часто выражается с использованием косинуса угла между направлением света и нормалью к поверхности. Если ϕ — угол между направлением света и нормалью, то угловое затухание может быть выражено следующим образом:

$$f(\phi) = \cos^{a_l} \phi$$

Здесь представляет собой коэффициент углового затухания, который уменьшает интенсивность света по мере увеличения угла. Когда свет падает под прямым углом (угол), угловое затухание равно 1, и свет не затухает. При увеличении угла, значение косинуса уменьшается, что приводит к уменьшению интенсивности света.



Рис. 4: Интенсивность углового затухания в зависимости от a_l

Эффекты освещения поверхности

В компьютерной графике эффекты освещения поверхности важны для создания реалистичных и привлекательных визуальных изображений. Эти эффекты обусловлены взаимодействием света с материалами поверхности объектов. Вот несколько основных эффектов освещения поверхности:

- Фоновое освещение (Ambient Occlusion, K_a);
- Рассеянное освещение (Diffuse Lighting, K_d);
- Зеркальное отражение (Specular Reflection, K_s);
- Отраженный свет (Reflection);
- Преломление (Refraction);
- Тени (Shadows);
- Глосс (Gloss).

Модель Блинна-Фонга

Эффекты освещения поверхности

Отраженный свет (Reflection): Эффект отраженного света моделирует отражение окружающей среды на поверхности объекта. Это может включать отражение других объектов, окружения или облаков.

Преломление (Refraction): Когда свет проходит через прозрачные материалы, происходит преломление. Этот эффект приводит к изменению направления света и созданию искажений на границе между материалами с разными оптическими свойствами.

Тени (Shadows): Тени создаются благодаря препятствиям, которые мешают свету достигнуть определенных областей поверхности. Тени важны для добавления глубины и реализма в изображения.

Глосс (Gloss): Этот эффект описывает степень блеска или матовости поверхности. Гладкие и блестящие поверхности имеют низкую степень матовости, в то время как матовые материалы выглядят более матовыми.

Эффекты освещения поверхности

В компьютерной графике эффекты освещения поверхности важны для создания реалистичных и привлекательных визуальных изображений. Эти эффекты обусловлены взаимодействием света с материалами поверхности объектов. Вот несколько основных эффектов освещения поверхности:

- Фоновое освещение (Ambient Occlusion, K_a);
- Рассеянное освещение (Diffuse Lighting, K_d);
- Зеркальное отражение (Specular Reflection, K_s);
- Отраженный свет (Reflection);
- Преломление (Refraction);
- Тени (Shadows);
- Глосс (Gloss).

Свойства материала

К свойствам материала добавляются еще коэффициенты:

k_e — свойство материала излучать свет;

k_{α} — прозрачность;

β — коэффициент блеска.

Свойства материала

Когда речь идет о свойствах материала в приложении к освещению, то имеется в виду его способность воспринимать каждую из трех компонент цвета каждой составляющей освещенности. Дополнительно, материал может сам излучать свет. Т.о. цветовые свойства материала задаются коэффициентами, которые объединяются в тройки:

k_a — свойство материала воспринимать фоновое освещение;

k_d — свойство материала воспринимать рассеянное освещение;

k_s — свойство материала воспринимать зеркальное освещение.

Вычисление угла между отраженным лучом и направлением на наблюдателя

Угол между отраженным лучом и направлением на наблюдателя можно рассчитать по следующей формуле:

$$R + L = 2(N \cdot L)N$$

$$R = 2(N \cdot L)N - L$$

Скалярное произведение $(R \cdot V)$ рассчитывается по формуле:

$$(R \cdot V) = 2(N \cdot L)(N \cdot V) - (L \cdot V)$$

Модель Блинна-Фонга

Вычисление угла между отраженным лучом и направлением на наблюдателя

Вычисление угла между отраженным лучом и направлением на наблюдателя

Угол между отраженным лучом и направлением на наблюдателя можно рассчитать по следующей формуле:

$$R + L = 2(N \cdot L)N$$

$$R = 2(N \cdot L)N - L$$

Скалярное произведение $(R \cdot V)$ рассчитывается по формуле:

$$(R \cdot V) = 2(N \cdot L)(N \cdot V) - (L \cdot V)$$

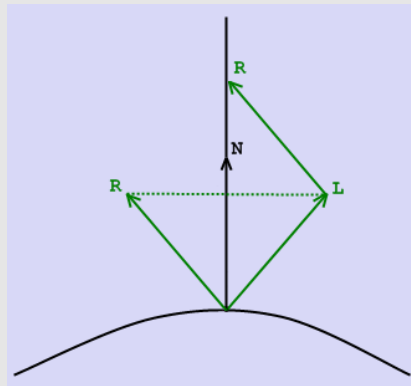


Рис. 5: Векторы в модели освещенности Блинна

$$I_a = k_a I_a,$$

где I_a — фоновая составляющая освещенности в точке; k_a — свойство материала воспринимать фоновое освещение; I_a — мощность фонового освещения.

фоновая составляющая освещенности не зависит от пространственных координат освещаемой точки и источника. Поэтому при моделировании освещения, в большинстве случаев, не имеет смысла брать более одного фонового источника света. Часто просто задается некое глобальное фоновое освещение всей сцены.

Фоновое освещение

$I_a = k_a I_a,$

где I_a — фоновая составляющая освещенности в точке; k_a — свойство материала воспринимать фоновое освещение; I_a — мощность фонового освещения.

Фоновая составляющая освещенности не зависит от пространственных координат освещаемой точки и источника. Поэтому при моделировании освещения, в большинстве случаев, не имеет смысла брать более одного фонового источника света. Часто просто задается некое глобальное фоновое освещение всей сцены.

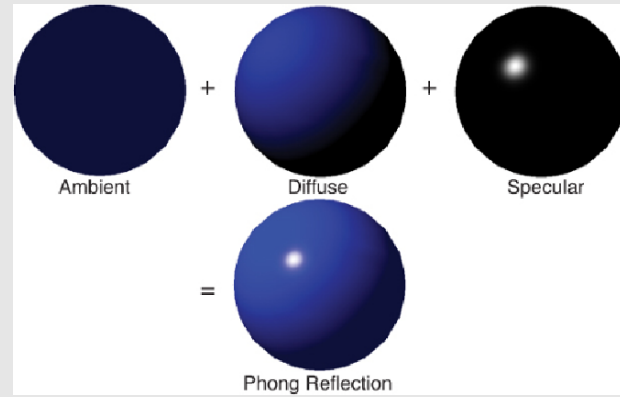


Рис. 6: Виды отражений

Рассеянное освещение (Diffuse Reflection): Описывает равномерное рассеивание света от поверхности во всех направлениях. Интенсивность рассеянного света зависит от угла между нормалью к поверхности и направлением света.

$$I_d = k_d(L \cdot N)I_d,$$

где I_d — рассеянная составляющая освещенности в точке; k_d — свойство материала воспринимать рассеянное освещение; I_d — мощность рассеянного освещения; L — направление из точки на источник; N — вектор нормали в точке.

└ Рассеянный свет

Рассеянное освещение (Diffuse Reflection): Описывает равномерное рассеивание света от поверхности во всех направлениях. Интенсивность рассеянного света зависит от угла между нормалью к поверхности и направлением света.

$$I_d = k_d(L \cdot N)I_d,$$

где I_d — рассеянная составляющая освещенности в точке; k_d — свойство материала воспринимать рассеянное освещение; I_d — мощность рассеянного освещения; L — направление из точки на источник; N — вектор нормали в точке.

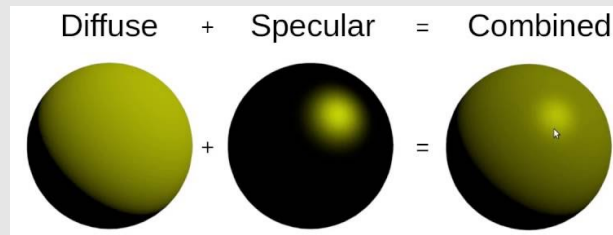


Рис. 7: Виды отражений

Зеркальное отражение

Зеркальное отражение (Specular Reflection): Моделирует отражение света от блестящих или гладких поверхностей. Этот компонент создает яркие блики на поверхности и зависит от угла между направлением обзора (направление, с которого наблюдается поверхность) и направлением отраженного света.

$$I_s = k_s \cos^\alpha(R, V) I_d = k_s (R \cdot V)^\alpha I_d,$$

где I_s — зеркальная составляющая освещенности в точке; k_s — коэффициент зеркального отражения; I_d — мощность зеркального освещения; R — направление отраженного луча; V — направление на наблюдателя; α — коэффициент блеска, свойство материала.

Модель Блинна-Фонга

Зеркальное отражение

Именно зеркальное отражение представляет наибольший интерес, но в то же время его расчет требует больших вычислительных затрат. При фиксированном положении поверхности относительно источников света фоновая и рассеянные составляющие освещения могут быть просчитаны единожды для всей сцены, т.к. их значение не зависит от направления взгляда. С зеркальной составляющей этот фокус не работает и придется пересчитывать её каждый раз, когда взгляд меняет свое направление.

Во всех вычислениях выше, для рассеянной и зеркальной компонент, если скалярное произведение в правой части меньше нуля, то соответствующая компонента освещенности полагается равной нулю.

Зеркальное отражение

Зеркальное отражение (Specular Reflection): Моделирует отражение света от блестящих или гладких поверхностей. Этот компонент создает яркие блики на поверхности и зависит от угла между направлением обзора (направление, с которого наблюдается поверхность) и направлением отраженного света.

$$I_s = k_s \cos^\alpha(R, V) I_d = k_s (R \cdot V)^\alpha I_d,$$

где I_s — зеркальная составляющая освещенности в точке; k_s — коэффициент зеркального отражения; I_d — мощность зеркального освещения; R — направление отраженного луча; V — направление на наблюдателя; α — коэффициент блеска, свойство материала.

Модель освещения и методы затенения

$$I = k_e + I_a k_a + \sum_{j=1}^m \frac{I_j}{d + k} \left[k_d (n_j \cdot L_j) + k_s (R_j \cdot v)^\alpha \right],$$

где I — интенсивность излучения; k_e — способность материала излучать свет; I_a — интенсивность поглощения (absorption coefficient); k_a — коэффициент поглощения; I_j — интенсивность ИС; d — расстояние от ИС до объекта; k — константа (трюк, чем ближе, тем больше величина); k_d — коэффициент диффузного отражения; k_s — коэффициент зеркального отражения; α — коэффициент блеска, свойство материала; n_j — нормаль; L_j — вектор направления на ИС; R_j — вектор отражения ИС; v — вектор направления камеры или точки обзора; m — количество ИС.

Сравнение простейших методов затенения:

В методе плоского затенения освещение вычисляется один раз для каждого полигона в сцене.

В методе затенения по Фонгу для каждой вершины полигона

Модель Блинна-Фонга

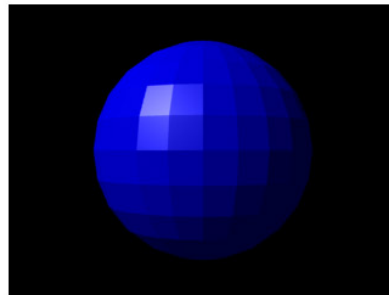
Модель освещения и методы затенения

Модель освещения и методы затенения

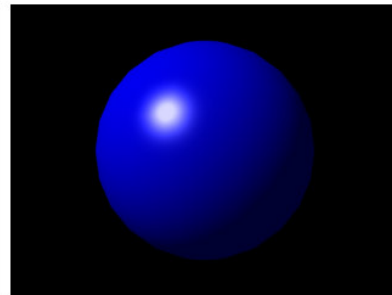
$$I = k_e + I_a k_a + \sum_{j=1}^m \frac{I_j}{d + k} \left[k_d (n_j \cdot L_j) + k_s (R_j \cdot v)^\alpha \right],$$

где I — интенсивность излучения; k_e — способность материала излучать свет; I_a — интенсивность поглощения (absorption coefficient); k_a — коэффициент поглощения; I_j — интенсивность ИС; d — расстояние от ИС до объекта; k — константа (трюк, чем ближе, тем больше величина); k_d — коэффициент диффузного отражения; k_s — коэффициент зеркального отражения; α — коэффициент блеска, свойство материала; n_j — нормаль; L_j — вектор направления на ИС; R_j — вектор отражения ИС; v — вектор направления камеры или точки обзора; m — количество ИС.

Сравнение простейших методов затенения:
В методе плоского затенения освещение вычисляется один раз для каждого полигона в сцене.
В методе затенения по Фонгу для каждой вершины полигона



FLAT SHADING



PHONG SHADING

Рис. 8: Сравнение плоское затенение (слева) и затенение Фонга (справа)

Модель Блинна-Фонга

Упрощенный расчет зеркальной компоненты освещенности

Для расчета отраженной компоненты требуется выполнить довольно громоздкие вычисления. Существует модель Блинна-Фонга, представляющая собой модель Фонга с упрощенным расчетом зеркального отражения. Вычислим в каждой точке вектор полупути H (halfway vector):

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

который показывает ориентацию площадки, на которой будет максимальное отражение.

Тогда величину $(R \cdot V)^\alpha$ можно заменить величиной $(H \cdot N)^\beta$.

Модель Блинна-Фонга

└ Модель Блинна-Фонга

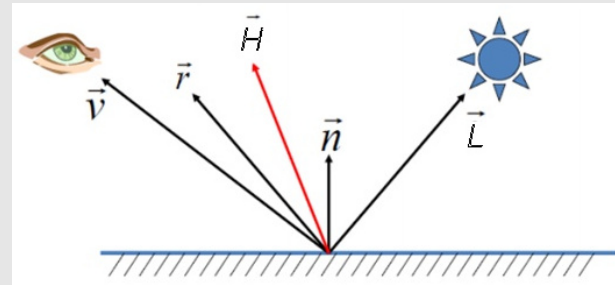


Рис. 9: Векторы в модели освещенности Блинна-Фонга

Модель Блинна-Фонга
Упрощенный расчет зеркальной компоненты освещенности

Для расчета отраженной компоненты требуется выполнить довольно громоздкие вычисления. Существует модель Блинна-Фонга, представляющая собой модель Фонга с упрощенным расчетом зеркального отражения. Вычислим в каждой точке вектор полупути H (halfway vector):

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

который показывает ориентацию площадки, на которой будет максимальное отражение. Тогда величину $(R \cdot V)^\alpha$ можно заменить величиной $(H \cdot N)^\beta$.

Модель освещения Блинна-Фонга

$$I = K_a I_a + K_d(n \cdot l) + K_s(n \cdot h)^p,$$

где

n — вектор нормали к поверхности в точке;

l — падающий луч (направление на источник света);

h — отраженный луч (направление идеально отраженного от поверхности луча).

$$h = 2(l \cdot n)n - l,$$

где

K_a — коэффициент фонового освещения;

K_s — коэффициент бликового освещения;

K_d — коэффициент диффузного освещения.

Модель Блинна-Фонга

Модель освещения Блинна-Фонга

$$I = K_a I_a + K_d(n \cdot l) + K_s(n \cdot h)^p,$$

где

n — вектор нормали к поверхности в точке;

l — падающий луч (направление на источник света);

h — отраженный луч (направление идеально отраженного от поверхности луча).

$$h = 2(l \cdot n)n - l,$$

где

K_a — коэффициент фонового освещения;

K_s — коэффициент бликового освещения;

K_d — коэффициент диффузного освещения.

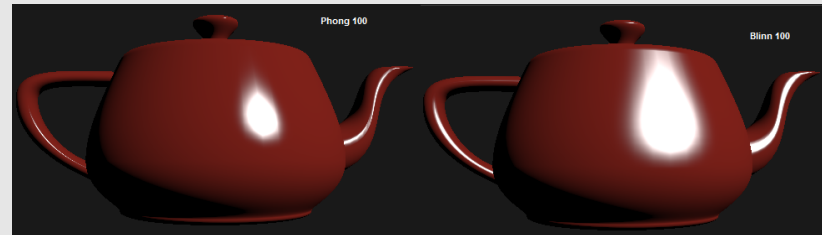


Рис. 10: Сравнение моделей Фонга и Блинна-Фонга