

УДК 004.925.5

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦВЕТА

Р. М. Ганеев, заведующий кафедрой ИТГД РГРТУ, д.т.н., профессор; ranas@list.ru

Е. А. Уварова, к.т.н., доцент кафедры ИТГД РГРТУ; uvarova_rgrtu@mail.ru

Рассмотрена задача настройки реалистичного цвета поверхности трехмерного предмета на границе двух сред с минимальным количеством настроек для программ визуализации. Целью работы является методика трехмерного моделирования цвета предметов для построения их изображений. Рассмотрены теоретические основы формирования цвета и восприятия вида поверхности. Проанализированы формулы Френеля для расчета отражения и преломления света при прохождении монохроматической световой волны. Рассмотрен классический способ освещения с трех точек для реалистичного трехмерного моделирования изображения предметов. Приведены обобщающие рекомендации для настройки цвета бликов и зеркальных отражений гладких поверхностей на основе описания физических свойств металлов и стекла. Рассмотрены отдельные случаи зеркальных отражений золота и меди. Показан результат использования методики для визуализации сложной сцены с золотыми и стеклянными предметами.

Ключевые слова: трехмерное моделирование, отражение, шероховатость, цвет, свет, стекло, металл, золото, реалистичное изображение.

Постановка задачи

Человек тысячи лет представляет мир трехмерным. Но первые существенные шаги трехмерной компьютерной графики были сделаны лишь в конце 20-го века, когда матричные преобразования компьютерной геометрии совершили огромный скачок в скорости вычисления изображений трехмерных сцен. Сегодня успехи трехмерной графики связаны с развитием программ визуализации, которые способны вычислять оптические эффекты по точным формулам физики.

Особенно важными являются точные расчеты распространения света на границе двух сред, которые и дают нам представление о свойствах поверхности трехмерного предмета. Например, отраженный свет формирует цвет поверхности.

В этих расчетах наиболее сложны отражения гладких поверхностей металлов и стекла. Но даже с такими расчетами большинство программ визуализации справляются очень успешно.

Несмотря на то, что в основе расчета лежат одни и те же формулы физики, разные программы визуализации требуют разных настроек цвета материалов.

В литературе обычно описывают теоретические основы отражения, поглощения и прохождения света через границу разных сред на базе формул Френеля и дают полезные рекомендации для частных задач. Другая крайность, когда путем

большого количества настроек лучей воспроизводят яркие цветовые эффекты, зачастую нарушая реалистичное представление о предмете и требуя огромных затрат времени визуализации.

Такие описания чаще запутывают разработчика, чем помогают ему настроить реалистичный цвет поверхности трехмерного предмета.

Цель работы

Целью работы является методика настроек цвета бликов и зеркальных отражений гладких поверхностей на основе описания физических свойств металлов и стекла. Результаты показаны на примере визуализации сложной сцены с золотым и стеклянным предметами.

Общие сведения о цвете предметов

Окружающие нас предметы мы видим благодаря свету.

Падая на освещаемый предмет, свет частично отражается от поверхности предмета и рассеивается в пространстве, частично поглощается веществом предмета и частично проходит сквозь него.

Если вещество пропускает все падающее на предмет излучение, то предмет невидим. Чистый воздух и прозрачное стекло – примеры распространенных материалов, пропускающих свет. Если вещество полностью поглощает падающее на него излучение, то предмет выглядит черным. Большинство предметов поглощают часть, а не весь падающий на них свет. Это частичное по-

глошение света является одним из факторов, от которых зависит, какого цвета для человека будет определенный предмет – черного, белого или какого-либо промежуточного серого. Если в отраженном свете присутствуют все длины волн видимого диапазона и интенсивность всех волн одинаковая, то цвет предмета воспринимается как белый.

Цвет предметов зависит от отражения и поглощения веществом волн различного спектрального состава. Например, предмет выглядит синим, если он отражает только «синие» лучи, а все остальные поглощает.

Необходимо учитывать, что цвет – это прежде всего ощущение, которое получает человек при попадании на сетчатку глаза световых лучей. Предмет выглядит «синим», если спектральный состав отраженного света формирует в мозге человека отклик, соответствующий ощущению «синего» цвета. Для человека совершенно не важно, какая поверхность отражает определенный спектр, реальный объект сцены или участок монитора. Именно поэтому так важно реалистичное трехмерное моделирование изображения.

Свойства поверхности предмета также сильно влияют на способы отражения – одни предметы кажутся матовыми, а другие блестящими или даже могут зеркально отражать лучи.

С помощью трехмерного моделирования цвета воспроизводят форму и свойства поверхности предмета.

Граничные условия. Формулы Френеля

Рассмотрим формулы расчета отражения и преломления света при прохождении монохроматической световой волны частоты ω через границу раздела двух сред (рисунок 1) [1]. Здесь α – угол падения и отражения, n_1 и n_2 – показатели преломления сред (по умолчанию считаем, что n_1 – показатель преломления воздуха), β – угол преломления. Учитываем, что падающий неполяризованный свет после отражения или преломления становится частично поляризованным. Выполняется закон Снеллиуса $n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$.

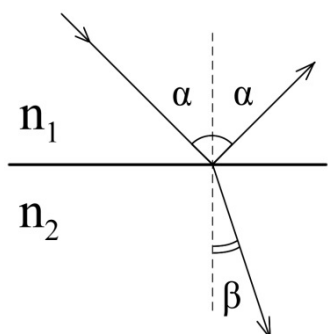


Рисунок 1 – Отражение и преломление света на границе двух сред

Формулы Френеля (1) описывают амплитудные коэффициенты отражения и пропускания для параллельной и перпендикулярной поляризации:

$$\begin{cases} r_{\parallel} = -\frac{\operatorname{tg}(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}(\alpha + \beta)}; \\ r_{\perp} = -\frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)}; \\ t_{\parallel} = \frac{2 \sin \beta \cos \alpha}{\sin(\alpha + \beta) \cos(\alpha - \beta)}; \\ t_{\perp} = \frac{2 \sin \beta \cos \alpha}{\sin(\alpha + \beta)}. \end{cases} \quad (1)$$

Нас в первую очередь интересует интенсивность R отраженной волны (2), которая пропорциональна квадрату напряженности электрического поля $R = |r|^2$. При отсутствии поглощения на границе справедливо равенство $R + T = 1$.

$$\begin{cases} R_{\parallel} = \left(\frac{\operatorname{tg}(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}(\alpha + \beta)} \right)^2; \\ R_{\perp} = \left(\frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \right)^2; \\ T_{\parallel} = 1 - R_{\parallel}; \\ T_{\perp} = 1 - R_{\perp}. \end{cases} \quad (2)$$

Формулы (3) описывают коэффициенты отражения R_0 и T_0 прозрачности в предельном случае нормального падения света на границу раздела ($\alpha = \beta = 0$).

$$R_0 = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2; \quad T_0 = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2}. \quad (3)$$

Отражательная способность стекла ($n=1.5$) в соответствии с формулой (3) равна 4 %, а для воды ($n=1.33$) – 2 %. Но, с увеличением угла падения, отражающая способность даже стекла и воды возрастает.

Формулы (1) – (3) справедливы и для монохроматических волн. При этом коэффициент отражения зависит от длины волны.

В формулах Френеля для металлов можно приравнять нулю коэффициент прозрачности, а коэффициент отражения устремить к 1.

Формулы (1) – (3) служат основой настроек цветовых характеристик гладких поверхностей.

Например, зная показатели преломления материалов, можно рассчитать многие настройки.

Нужно при этом настроить зависимость отражающей способности от угла α падения света. Если для металлов эта зависимость равномерно возрастает, то для прозрачных материалов отра-

жающую способность, в силу очень сложной зависимости, рекомендуется настроить зрительным способом.

Сегодня наблюдается стремление настраивать зависимость [2] отражающей способности от длин волн падающего света. В идеале такую зависимость должны учитывать программы визуализации, беря за основу цвет зеркальных отражений из настроек предмета.

Трехмерное моделирование изображения

Рассмотрим теперь практические задачи трехмерного моделирования изображений.

Моделирование цвета начинают с постановки света [3]. На этом этапе строят объемное представление о предмете, и предмет пока удобно считать матовым.

Классическим способом трехмерного моделирования изображений предметов является освещение с трех точек.

Рассмотрим роли этих точек.

1. Ключевой свет, он же рисующий, создает основное освещение предмета и задает угол освещения. Ключевой свет формирует объем моделируемой сцены. Для реалистичного восприятия зрителем сцены достаточно одного источника ключевого света. Это аналог солнца (или луны). Он ярче остальных источников и отображает самые заметные тени (рисунок 2).

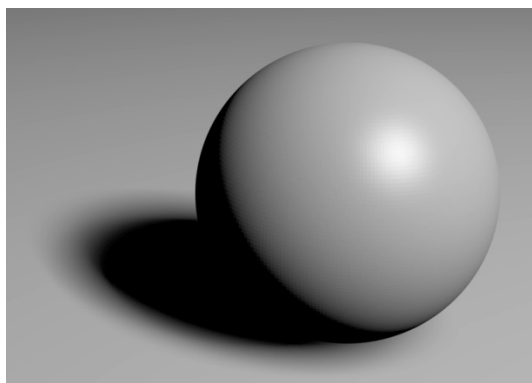


Рисунок 2 – Освещение предмета ключевым светом

При съемке головы человека угол освещения подбирают так, чтобы не было длинных теней от носа, глубоких теней от бровей, подбородка. Если лампа ключевого света расположена под малым углом к камере, то изображение объекта получится плоским. Слишком большой по отношению к камере угол даст резкое изображение с большим неосвещенным участком. Допустимым является угол от 15° до 45° .

2. Заливающий свет, он же моделирующий, смягчает и усиливает освещение от ключевого света, делая освещаемый предмет более видимым (рисунок 3). Он имитирует эффект отра-

женного света или вспомогательных источников света.

Теоретически максимальный эффект достигается, если заливающий свет расположен напротив ключевого света. Но тогда останутся плохо освещенные участки и будут освещены участки, которые не видны в кадре. Для увеличения визуального эффекта заливающий свет располагают под углом от 15° до 60° к камере.

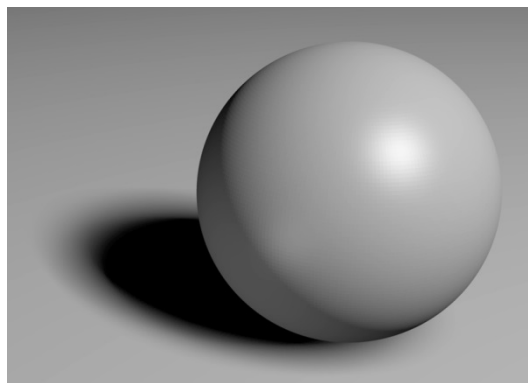


Рисунок 3 – Освещение предмета ключевым и заливающим светом

Прозрачные предметы нежелательно освещать заливающим светом. Заливающий свет не используется и при наличии отраженного света от окружающих предметов.

При слишком большом соотношении между интенсивностью ключевого и заливающего света (например, 5:1) сцена воспринимается темной и мрачной, а ключевой свет выглядит резким. В любом случае интенсивность заливающего света должна быть достаточно большой, чтобы были видны все детали. На рисунке 3 это соотношение уменьшено в три раза и сфера смотрится гармоничнее и объемнее. Далее уменьшать соотношение не рекомендуется.

3. Задняя подсветка способна придать блеск поверхности предмета и провести отчетливую границу между предметом и фоном. В качестве задней подсветки может быть как фоновый, так и контровой свет. Она должна быть довольно яркой, иногда даже ярче ключевого света.

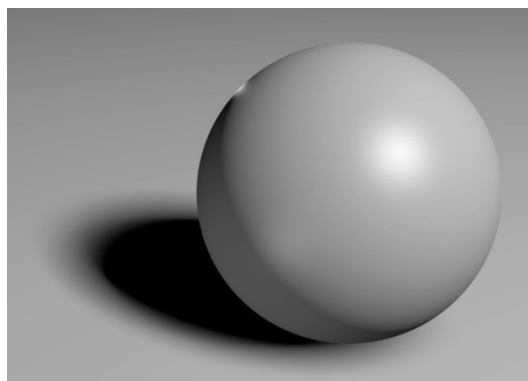


Рисунок 4 – Освещение предмета с трех точек

Задняя подсветка находится позади объекта, выделяя видимый край его поверхности, и не мешает затенению от ключевого света (рисунок 4).

В случае фоновой подсветки источник света находится между объектом и фоном и направлен на фон. Фоновая подсветка создает мягкий светлый ореол на фоне и применима только в случае достаточно крупных объектов. Контровой источник света направлен на объект. Такая подсветка создает яркий и контрастный ореол. Часто применяется для объектов с ярко выраженной фактурой, например мех или волосы. На рисунке 4 приведен пример контровой подсветки.

Заливающий свет и задняя подсветка используются в меру необходимости – их роль могут выполнять другие источники света, например свет от окружающих предметов.

Трехмерное моделирование цвета

Цвет предмета определяется отраженным спектром света, а свойства поверхности определяют способы отражения (рисунок 5).

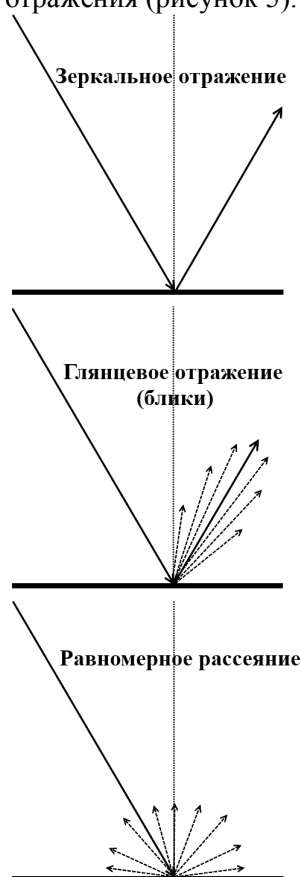


Рисунок 5 – Способы отражения света

При зеркальном отражении луча света отражается единственный луч. Глянцевое отражение похоже на зеркальное, но происходит рассеивание вокруг отраженного луча, и мы видим блик. В обоих случаях видимость зависит от направления отражения. При равномерно рассеянном

отражении блики будут только на выпуклых участках. Шероховатость реальных поверхностей неравномерна, и мы видим сложным образом смешанное рассеивание отраженного света с разными по размеру и форме бликами.

И всестороннее рассеяние, и блики создаются одним и тем же процессом отражения света. Диффузия свойственна неровностям, величина которых больше длины волны, подобно тому, как твердый шарик отскакивает от стены с большими (по сравнению с шариком) неровностями в любом направлении. Блики появляются на участках, величина неровностей в которых меньше длины волны.

Поверхности с микроскопической неровностью (матовым покрытием) тоже считаются шероховатыми. Некоторые поверхности (очищенная щеткой сталь, компакт-диски и деревянные предметы) имеют небольшие бороздки или волокнистую структуру. В результате получается анизотропное отражение. На поверхностях, равномерно рассеивающих отраженный свет во всех направлениях, получается изотропное отражение. В трехмерном моделировании для воспроизведения таких свойств достаточно выбрать соответствующий тип материала.

Длины волн спектральных цветов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Длины волн спектральных цветов

Цвет	Диапазон длин волн, нм
Фиолетовый	380—440
Синий	440—485
Голубой	485—500
Зелёный	500—565
Жёлтый	565—590
Оранжевый	590—625
Красный	625—740

Если количество наблюдаемого отраженного света зависит от угла обзора, то это отражение по Френелю. Такие материалы, помимо обычных свойств отражательной способности, позволяют управлять цветом или прозрачностью поверхности.

Диапазон видимых длин волн находится в пределах от 380 нм до 740 нм. Но это не означает, что мы не видим предметы с очень гладкими поверхностями. Мы их видим благодаря бликам и зеркальным отражениям.

Методика моделирования цвета

Настройки величин рассеяния, бликов и зеркального отражения зависят от шероховатости

поверхности предмета.

Рассеяние. Если шероховатость больше длин волн спектральных цветов, то величины бликов и зеркальных отражений можно приравнять к нулю. При этом в результатах визуализации блики все равно будут видны на изгибах поверхности.

Блики. Если шероховатость находится в диапазоне длин спектральных цветов, то будут и рассеяние и блики. Цвет рассеяния выбирают из спектральных цветов, длины волн которых меньше шероховатости, а цвет бликов – из спектральных цветов, длины волн которых больше шероховатости.

Зеркальные отражения. Если шероховатость меньше длин волн спектральных цветов, то рассеяние и блики отсутствуют, и нужно настраивать только зеркальные отражения. Эта задача наиболее сложная и накладывает большие требования к программе визуализации. Для трехмерной графики достаточно, чтобы программа визуализации вычисляла отражения по формулам Френеля.

В настройках цвета зеркальных отражений также требуется указывать цвет отражений, хотя зеркальные отражения не имеют цвета. Обычно цвет зеркальных отражений назначают черным.

Исключением являются золото и медь – их зеркальные отражения цветные. Кроме этого, цвет зеркальных отражений этих металлов зависит от угла отражения. Многие программы визуализации автоматически учитывают этот исключительный случай.

Другая проблема цвета зеркальных отражений заключается в том, что, в отличие от реальной жизни, трехмерная сцена необязательно наполнена окружающими предметами. Тогда изображение сцены может содержать большие черные участки. Чтобы этого не было, можно назначить белый цвет зеркальным отражениям.

Формулы Френеля учитывают и прозрачные предметы. Но программы визуализации в первую очередь вычисляют отражения света.

Эксперимент

На практике трехмерной графики наиболее сложны задачи моделирования цвета зеркальных поверхностей. Рассмотрим примеры моделирования цвета таких предметов.

Источником света выбираем солнце, а окружение настроим как голубое небо в яркий солнечный день. Линию горизонта можно также установить цвета неба или белым. В качестве источника ключевого света используем солнце. Можно добавить и другие источники света, но блики и отражения от них усложнят анализ и без

того непростой задачи.

Для фона поставим куб красного цвета и в настройках куба добавим слабые (интенсивность около 0.2) блики белого цвета. Блики на поверхности куба нужны для демонстрации их видимости лишь под определенным углом.

На фоне куба покажем золотую обезьянку.

Затем поместим обезьянку в стеклянную сферу.

На результирующей сцене посмотрим отражение этих предметов на идеально зеркальной поверхности.

Куб и зеркальная поверхность служат лишь вспомогательными объектами, и для них не предусмотрено специальное освещение. Поэтому в результатах они не будут видны как объемные предметы.

Наиболее сложной частью задачи являются настройки цвета металлических предметов.

Металлы поглощают те или иные длины волн и отражают цветные лучи. То есть рассеянный цвет и цвет бликов и зеркальных отражений можно установить одинаковыми.

В современных таблицах цветов можно найти общепринятое RGB-значение цвета практически любого материала. Например, RGB-значение «медного цвета» равно (184, 115, 51). Это показывает, что медь больше всего отражает красный цвет и больше всего поглощает синюю составляющую спектра света.

В технике используют показатели доли отраженного света (в %) полированной поверхностью (при нормальном падении) для длин волн видимого спектра (таблица 2). Такую информацию также можно использовать при настройках цвета металлов.

Таблица 2 – Отражение света металлами

Длина волны, нм	Алюминий	Медь	Сталь	Серебро	Никель	Хром	Цинк
500 (синий)	88	44	56	91	61	55	55
600 (зеленый)	89	72	57	93	65	-	58
700 (красный)	87	83	58	95	69	56	61

Металлы непрозрачны – их гладкая поверхность отражает падающие на нее световые лучи. Отражательная способность металлов выражается в характерном металлическом блеске, интенсивность которого зависит от доли поглощаемого

го металлом света – чем она меньше, тем ярче блеск. Если металл поглощает лучи различных длин волн неодинаково, допустим, коротковолновые лучи – в большей степени, то отраженный свет обогащается длинноволновыми лучами и, таким образом, металл приобретает желтую (золото) или красную (медь) окраску.

Высокая отражательная способность, обуславливающая характерный блеск большинства металлов, объясняется отсутствием поглощения видимого света, но ультрафиолетовое излучение металлы поглощают. Присущий металлам в большей или меньшей мере серебристый цвет является следствием того, что полоса поглощения частично захватывает видимую область и создает в отраженном свете незначительную разность длин волн. У серебра максимальная длина волны поглощаемого света составляет 270 нм, и поэтому серебро нам кажется белым.

Золото и медь обладают собственными, только им присущими цветовыми оттенками. Медь поглощает свет с длиной волны 580 нм. А свет с большими длинами волн отражается, придавая меди красноватый цвет. Золото поглощает излучение с длинами волн менее 500 нм, поэтому имеет желтую окраску.

Поверхность изделий из золота подобна многим очень гладким материалам – размеры шероховатости не более 200 нм (у золота около 75 нм, у хрома 125 нм). То есть отсутствует рассеяние в видимой области света и видимы только блики и зеркальные отражения.

Воспользуемся этой информацией для настройки значений цвета золота.

В настройках цвета равномерного рассеяния, бликов и зеркального отражения золота вводим справочное RGB-значение (255, 215, 0) «золотого цвета». Помним, что окрашенные отражения свойственны всем металлам.

Интенсивность равномерного рассеяния практически равна 0, интенсивность бликов установим 0.2, а интенсивность зеркальных отражений существенно больше и равна 1.

Максимальное значение интенсивности в программных средах трехмерного моделирования не ограничено. Поэтому эти значения нужно принять как относительные. Изменения в относительных значениях зависят от размеров шероховатости поверхности предмета.

Теперь рассмотрим наиболее сложные с точки зрения теории отражений настройки.

Для зеркальных отражений важно учитывать коэффициент Френеля для отражающего материала. Этот коэффициент в разных программных средах трехмерного моделирования может называться по-разному. В Blender коэффициент Фре-

неля для зеркальных отражений золота установим $Fresnel=1$ (в Blender этот коэффициент описывает зависимость силы отражения от угла отражения), а смещение по Френелю – $Blend=2$. Приблизительно такие же значения можно использовать практически для всех металлов.

Результат показан на рисунке 6.

Сразу же отметим, что из-за отсутствия специального освещения для куба неразличимы даже простейшие детали, например грани куба.



Рисунок 6 – Результаты настройки золота

Цвет золота получился вполне реалистичным. Как и должно быть для меди и золота, при изменении угла отражения появляются зеленые оттенки. Это, конечно же, заслуга программы визуализации.

Обратите внимание на блики – они, как и должно быть, видны только под определенным углом. На обезьянке блики видны, а на кубе невидимы.

Теперь поместим обезьянку в тонкую стеклянную сферу.

В настройках цвета равномерного рассеяния, бликов и зеркального отражения стекла вводим одинаковое RGB-значение (0, 0, 0) черного цвета.

Интенсивность равномерного рассеяния и бликов практически равна 0, а интенсивность зеркальных отражений установим 0.2. Интенсивность зеркальных отражений для прозрачных материалов намного меньше, чем для металлов. Для стеклянной сферы можно подобрать этот коэффициент таким, чтобы сфера была достаточно различима. В данном примере также установлено значение $Fresnel=0.3$.

Прозрачность установим 96 %. Зависимость прозрачности от угла падения также задают коэффициентом $Fresnel$. Но программа визуализации большую роль отдает расчетам интенсивности отражения, и настройки зависимости прозрачности от угла падения света несущественно отражаются в результатах.

Посмотрим теперь результат (рисунок 7).



Рисунок 7 – Результаты настройки стекла

Преломления лучей наблюдаем благодаря искажениям тени обезьянки и ребер куба. А сама стеклянная сфера видима только при больших углах отражения. Сфера хорошо пропускает свет, что видно на освещении обезьянки.

Отражения на сфере имеют цвет неба. То есть зеркальные отражения стекла не имеют собственного цвета.

На заключительной сцене эксперимента ниже куба и сферы поместим небольшую плоскую зеркальную поверхность. Зеркало как объект сцены нас не интересует. Нашей целью является исследование отражений куба, обезьянки и сферы на зеркальной поверхности.

Для зеркала цвет равномерного рассеяния, бликов и зеркального отражения стекла здесь установим равным значению белого цвета, т.е. RGB(255, 255, 255). Это сделано лишь для получения яркого изображения сцены. На самом же деле реальное зеркало имеет черный цвет и отображает все окружающие предметы. В этом эксперименте мало окружающих предметов и источников света. Поэтому отражениям зеркала присвоен белый цвет. Этого достаточно, чтобы зеркальная поверхность не имела собственного цвета.

Интенсивность равномерного рассеяния и бликов равна 0, а интенсивность зеркальных отражений установим 1. Зависимость зеркальных отражений от угла отражения установим $Fresnel=0$. То есть сила зеркальных отражений не будет зависеть от угла отражения.

Результат показан на рисунке 8.

Зеркало идеально выполняет свою работу.

Обратите внимание на блики, которые видны на отражении куба в зеркале. Дело в том, что в зеркале мы куб видим уже под другим углом, и под этим углом блики видны.

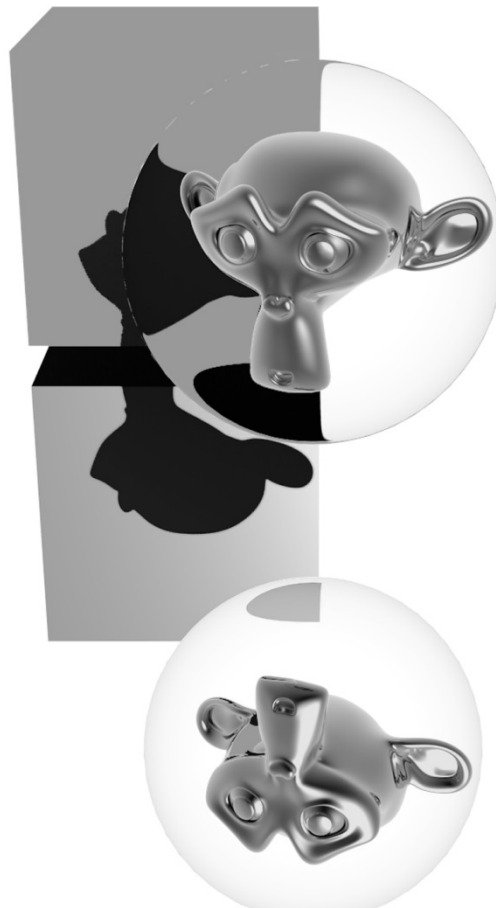


Рисунок 8 – Результаты настройки зеркала

Заключение

Предложенная методика трехмерного моделирования цвета предметов позволяет получить реалистичное изображение предметов сцены с минимальным количеством настроек.

Библиографический список

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики: учеб. пособие для вузов; в 5 томах. Том 4. Оптика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 1980. 752 с.
2. Соколов А. В. Оптические свойства металлов. М.: Госиздат. Физ.-мат. лит., 1961. 464 с.
3. Birn J. Digital Lighting and Rendering. San Francisco: New Riders, 2013. 464 p.

UDC 004.925.5

THREE-DIMENSIONAL MODELING OF COLOR

R. M. Ganeev, PhD (technical sciences), full professor, Head of the Department, RSREU, Ryazan;
ranas@list.ru

E. A. Uvarova, PhD (technical sciences), associate professor, RSREU, Ryazan; uvarova_rgrtu@mail.ru

The problem of setting a realistic three-dimensional subject color surface on the border of two environments with a minimum number of settings for visualization software is studied. The aim of this work is the technique of three-dimensional color modeling of objects to build their images. Theoretical bases of formation of color and perception are considered. Fresnel formulas for calculating the reflection and refraction of light when monochromatic light wave is passing are analyzed. The classic way of illumination with three points for realistic three-dimensional object images modeling is considered. General guidelines for configuring color highlights and specular reflections of smooth surfaces based on the description of physical properties of metals and glass are provided. Individual cases of specular reflections of gold and copper are considered. The results of using techniques for rendering complex scenes with gold and glass items are shown.

Keywords: three-dimensional modeling, reflection, roughness, color, light, glass, metal, gold, realistic image.

References

1. **Sivuhin D. V.** *Obshhij kurs fiziki. Uchebnoe posobie dlja vuzov v 5 tomah.* (General course of physics. Textbook for high schools in 5 volumes) Vol. 4. Optika. M.: FIZMATLIT. 1980, 752 p. (in Russian).
2. **Sokolov A. V.** *Opticheskie svojstva metallov.* (Optical properties of metals). Moscow: Gosizdat. Fiz.-mat. lit., 1961, 464 p. (in Russian).
3. **Birn J.** *Digital Lighting and Rendering.* San Francisco: New Riders, 2013. 464 p.