

ISSN 1996-1588

**Міністерство освіти і науки України**



## **НАУКОВІ ПРАЦІ**

ДОНЕЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Серія: Інформатика, кібернетика  
та обчислювальна техніка

№2(39) 2024



Дрогобич 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Наукові праці**  
Донецького національного технічного  
університету

**Серія: “Інформатика, кібернетика  
та обчислювальна техніка”**

Всеукраїнський науковий збірник

Заснований у травні 1996 року

Виходить 2 рази на рік

*№2 (39) ’ 2024*

**Дрогобич – 2024**

**УДК 004+519.6+519.7**

Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка": Всеукр. наук. зб. – Дрогобич: ДонНТУ, 2024. №2 (39). 66 с.

Публікується згідно з рішенням Вченої ради ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (протокол № 10 від 30.10.2024).

Збірник містить наукові статті співробітників ДонНТУ та інших навчальних і наукових закладів України, які є науковими партнерами ДонНТУ. Публікації висвітлюють результати наукових досліджень і розробок в таких напрямках, як інформатика, чисельні методи, паралельні обчислення, програмування, розробка засобів обчислювальної техніки, дослідження комп'ютерних мереж, машинна графіка і обробка зображень, математичне моделювання в різних галузях. Матеріали збірника призначені для наукових співробітників, викладачів, інженерно-технічних працівників, аспірантів та студентів.

**Засновник та видавець** – Донецький національний технічний університет (ДонНТУ)

#### ***РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:***

Д-р техн. наук, проф. Є.О. Башков (головний редактор); канд. техн. наук, доц. Н.О. Маслова, (заступник головного редактора); член-кореспондент НАН України, д-р техн. наук, проф. В.П. Боюн; д-р техн. наук, проф. О.А. Дмитрієва, д-р техн. наук, проф. О.О. Баркалов; д-р техн. наук, проф. О.В. Вовна; д-р техн. наук, проф. С.Д. Погорілий; д-р техн. наук, проф. О.Н. Романюк; д-р техн. наук, проф. В.А. Святний; д-р техн. наук, проф. Г.Г. Швачич; д-р техн. наук, доц. І.С. Лактіонов; канд. техн. наук, доц. І.Я. Зеленьова; канд. техн. наук, доц. О.В. Самощенко, канд. техн. наук, доц. І.А. Назарова (відп. секретар випуску).

#### **Адреса редакції:**

Юридична адреса: 85300, Україна, Донецька область, м. Покровськ, пл. Шибанкова, 2, ДВНЗ «ДонНТУ».

Фактична адреса: 82111, Україна, Львівська область, м. Дрогобич, вул. Самбірська, 76, ДВНЗ «ДонНТУ».

E-mail: [yevhen.bashkov@donntu.edu.ua](mailto:yevhen.bashkov@donntu.edu.ua)

Збірник зареєстровано в Державному комітеті інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України. Свідоцтво: серія КВ, №7374 від 03.06.2003.

Збірник включено до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії за спеціальностями 121 Інженерія програмного забезпечення, 122 Комп'ютерні науки, 123 Комп'ютерна інженерія (наказ Міністерства освіти і науки України №409 від 17 березня 2020 р.)

Збірник "Наукові праці ДонНТУ, серія "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка" за наказом № 409 МОНУ від 17. 03.2020 отримав категорію Б.

---

---

**ЗМІСТ**

О.А. Дмитрієва, В.Г. Гуськова, А.А. Халигов	4
Розробка різницевих композицій з ньютонівськими наближеннями для сурогатного моделювання	
О.В. Самощенко	12
Додавання і віднімання цілих чисел при зміщеному кодуванні з від'ємним нулем	
Є. К. Завальнюк, О. Н. Романюк	18
Адаптивний вибір моделі відбивної здатності поверхні для задач рендерингу	
В.П. Майданюк, О.Н. Романюк, С.В. Павлов, М.Л. Нечипорук	31
Підвищення коефіцієнта ущільненні зображень на основі двовимірних ортогональних перетворень	
С.Я. Гільгурт, А.В. Ковилін	41
Застосування алгоритмів машинного навчання для виявлення прихованих кіберзагроз на об'єктах енергетичної інфраструктури	
В.О. Бутко, К.М. Касьян, М.М. Касьян	49
Порівняння компіляторів для генерації опису апаратури на основі імперативної програми: HDL Coder та Vitis HLS	
А.О. Нікітенко, Є.А. Соболев	57
Ефективна модель виявлення мережеских вторгнень з використанням методів машинного навчання	

Є. К. Завальнюк, аспірант,  
О. Н. Романюк, д-р техн. наук, проф.,  
Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна  
qq9272627@gmail.com  
rom8591@gmail.com

## Адаптивний вибір моделі відбивної здатності поверхні для задач рендерингу

У статті запропоновано метод адаптивного вибору моделі відбивної здатності для задач рендерингу тривимірних сцен. Проаналізовано особливості розрахунку інтенсивності кольору пікселя під час зафарбовування поверхні об'єкта сцени. Розглянуто вклад дифузної та спекулярної складової у кінцеву інтенсивність кольору для різних матеріалів. Наведено основні групи моделей відбивної здатності поверхні, кожна з яких може бути застосована лише до певного типу поверхонь. Описано найбільш прості моделі відбиття світла від дифузних і спекулярних поверхонь, більш складні моделі відбиття світла, що враховують мікрогеометрію поверхні, та моделі, призначені для поверхонь особливого типу. Проаналізовано основні положення концепції адаптивного вибору моделі відбиття світла та типові етапи її реалізації. Обґрунтовано необхідність розробки нових методів адаптивного вибору моделей відбиття. Детально розглянуто особливості запропонованого методу для адаптивного вибору моделей відбиття світла. У межах методу, запропоновано підхід для вибору оптимальної емпіричної моделі відбиття для забезпечення високопродуктивного рендерингу сцени. Даний підхід базується на аналізі коефіцієнта спекулярності поверхні. Крім того, надано рекомендації вибору моделей відбиття світла для фотореалістичної візуалізації поверхонь загального типу, а також поверхонь спеціального типу, як тканини, волосся, багатошарові матеріали. Запропоновано використовувати просту модель відбиття світла замість мікрофасетної моделі, якщо шорсткість поверхні є малою. Такий підхід дозволяє сформувати високореалістичне зображення об'єкта сцени без зайвих обчислювальних затрат. На основі проведення дослідів за допомогою програмного засобу BRDF Explorer і використання метрики NMSE було визначено рівень шорсткості поверхні, де використання більш простої моделі є доцільним. Запропонований метод адаптивного вибору моделі відбиття може бути використаний для оптимізації графічних систем високореалістичного та високопродуктивного рендерингу.

**Ключові слова:** двопротенева функція відбивної здатності, адаптивний вибір, рендеринг, високопродуктивність, фотореалізм

**DOI:** 10.31474/1996-1588-2024-2-39-18-30

### Вступ

Рендеринг [1] є найбільш обчислювально складним етапом графічного конвеєра для формування тривимірних сцен, що полягає у визначенні кінцевих інтенсивностей кольору та координат пікселів.

В основі визначення інтенсивності кольору кожного пікселя зображення лежить розрахунок моделі відбивної здатності поверхні, що подає відбивні властивості матеріалу об'єкта сцени.

Важливо, що жодна з існуючих моделей відбивної здатності не є універсальною та не може бути застосована для усіх типів поверхонь і ситуацій рендерингу.

Найбільш складні моделі відбивної здатності враховують мікроскопічні особливості поверхонь об'єктів та добре підходять для фотореалістичної реалізації сцен. Якщо

можливості системи рендерингу, особливо у режимі реального часу, є обмеженими, й допускаються незначні відхилення у якості візуалізації об'єктів, то використання складних моделей відбиття є невиправданим.

Наприклад, у програмних системах високопродуктивного рендерингу замість моделей відбивної здатності високого степеня доцільно використовувати моделі менших степенів, якщо зниження якості зображення є прийнятним.

Загалом, популярні моделі відбивної здатності можуть бути використані для подання особливостей більшості типів матеріалів. Однак, окремі типи матеріалів, такі як волосся, тканини, характеризуються особливою структурою. Відповідно, для даних матеріалів необхідне застосування окремих моделей відбивної здатності. Тому актуальною є розробка методу адаптивного вибору моделі відбиття світла.

**Метою роботи** є розробка методу

адаптивного вибору моделі відбивної здатності.

**Огляд літератури**

Вираз для обчислення інтенсивності кольору [2] для окремого пікселя має вид

$$I = k_a \cdot I_a + k_d \cdot I_{dz} \cdot (\vec{L} \cdot \vec{N}) + k_s \cdot I_{dz} \cdot f_r.$$

Складова розсіяного освітлення [2] визначає відбите світло від інших об'єктів сцени та обчислюється на основі коефіцієнта розсіяного освітлення  $k_a$ , інтенсивності розсіяного освітлення  $I_a$ . Дифузна складова [2] відбитого освітлення полягає у тому, що світло однонамітно відбивається від поверхні об'єкта у різні сторони. Дана складова пов'язана із видимістю об'єкта. При її розрахунку враховуються інтенсивність джерела світла  $I_{dz}$ , коефіцієнт дифузного відбиття світла  $k_d$ , кут між векторами освітлення й нормалі  $\vec{L}, \vec{N}$ . Спекулярна складова [2] забезпечує відображення відблисків на поверхні об'єкта й обчислюється на основі інтенсивності джерела освітлення  $I_{dz}$ , коефіцієнта спекулярного відбиття  $k_s$ , двопрменевої функції відбивної здатності  $f_r$  (ДФВЗ). Як правило, блискучі та гладкі матеріали, як поліровані метали, характеризуються високим значенням  $k_s$ . Шорсткі та матові поверхні (тканини, деревина) мають високе значення  $k_d$ .

ДФВЗ [2-6] є функціями, що визначають частку відбитого від поверхні випромінювання у напрямку спостерігача та, зазвичай, використовуються для візуалізації спекулярних відблисків поверхонь об'єктів.

ДФВЗ розраховуються згідно з виразом [7]

$$\frac{dL_r(\vec{V})}{dE_i(\vec{L})} = \frac{dL_r(\vec{V})}{L_i(\vec{L}) \cos(\theta_i) dw_i},$$

де  $L_r$  – енергетична яскравість у напрямку спостерігача,  $L_i$  – енергетична яскравість у напрямку падіння світла,  $E_i$  – опроміненість у напрямку падіння світла,  $dw_i$  – диференціальний тілесний кут падіння світла,  $\vec{V}, \vec{L}$  – відповідно вектори до спостерігача та джерела світла,  $\theta_i$  – кут між нормаллю  $\vec{N}$  і  $\vec{L}$ .

На рис. 1 зображено типові вектори [2] для розрахунку ДФВЗ. Окрім векторів  $\vec{N}, \vec{L}, \vec{V}$  зображено вектор дзеркального відбиття  $\vec{R}$  ( $\vec{R} = 2(\vec{L} \cdot \vec{N})\vec{N} - \vec{L}$ ), нормалізований напіввектор між  $\vec{L}, \vec{V}$   $\vec{H}$  ( $\vec{H} = \frac{\vec{L} + \vec{V}}{|\vec{L} + \vec{V}|}$ ).

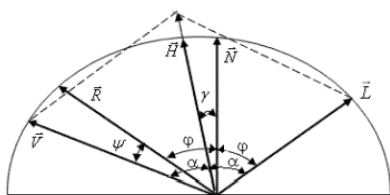


Рисунок 1 – Типові вектори для розрахунку ДФВЗ

ДФВЗ Ламберта [8] є однією з найпростіших моделей відбиття світла й підходить лише для моделювання дифузної складової кольору. Використовується вираз

$$\frac{k_d}{\pi} \cdot (\vec{L} \cdot \vec{N}). \tag{1}$$

Поширена модифікація моделі полягає у використанні коефіцієнта Френеля  $F$  для врахування факту, що відбите випромінювання є недоступним для міжповерхневого розсіювання. У результаті, вводиться додатковий множник [9]

$$(1 - F(\vec{H}, \vec{L})) \tag{2}$$

Більш складною є дифузна складова ДФВЗ Disney, що враховує шорсткість поверхні  $\alpha$ . Складова розраховується згідно з формулою [10]

$$\frac{k_d}{\pi} (1 + (F_{D90} - 1)(1 - \vec{N} \cdot \vec{L})^5) \cdot (1 + (F_{D90} - 1)(1 - \vec{N} \cdot \vec{V})^5), \tag{3}$$

де  $F_{D90} = 0.5 + 2\alpha(\vec{H} \cdot \vec{L})^2$ .

Іншою популярною моделлю для дифузних шорстких поверхонь є ДФВЗ Орена-Найяра.

Прості емпіричні спекулярні моделі, як ДФВЗ Блінна та Фонга, можуть бути використані лише у системах високопродуктивного рендерингу, де якість візуалізації може бути наближеною.

Модель Блінна-Фонга визначається за формулою [2]

$$\cos(\theta_h)^n, \tag{4}$$

де  $\theta_h$  – кут між  $\vec{N}$  і  $\vec{H}$ ,  $n$  – коефіцієнт спекулярності поверхні, що подає рівень сфокусованості відблиска (значення велике для гладких і блискучих поверхонь).

На відміну від більш ранньої моделі Фонга, усувається необхідність складного розрахунку вектора  $\vec{R}$  для знаходження кута  $\gamma$ . Також, уникаються ситуації, коли кут між векторами перевищує  $90^\circ$ .

Більш складними є мікрофасетні моделі [2, 11-12] відбиття світла, що полягають у поданні поверхонь об'єктів як сукупності мікроскопічних ділянок (мікрофасет). Такі моделі базуються на обчисленні розподілу мікрофасет, враховуючи шорсткість поверхні  $\alpha$ . Також враховуються затінення ділянок і залежність відбиття світла від кута освітлення.

Базова мікрофасетна модель Кука-Торренса [2] обчислюється за формулою

$$\frac{FDG}{\pi \cos \theta_i \cos \theta_o}, \tag{5}$$

де  $\theta_o$  – кут між  $\vec{N}, \vec{V}$ ,  $F, D, G$  – коефіцієнт Френеля, розподіл мікрофасет, функція ослаблення світла відповідно.

Популярною модифікацією моделі є ДФВЗ Disney [10]. Модель включає використання GGX-розподілу у якості  $D$  для головної спекулярної пелюстки:

$$\frac{\alpha_g^2}{\pi} \frac{1}{(1+(\alpha_g^2-1)\cos^2\theta_h)^2}, \quad (6)$$

де  $\alpha_g = \alpha^2$ .

У випадку анізотропного відбиття світла розподіл  $D$  моделі Disney має вид [10]

$$\frac{1}{\pi \alpha_{gx} \alpha_{gy}}, \quad (7)$$

$$\frac{1}{\left(\frac{(\vec{H} \cdot \vec{X})^2}{\alpha_{gx}^2} + \frac{(\vec{H} \cdot \vec{Y})^2}{\alpha_{gy}^2} + (\vec{H} \cdot \vec{N})^2\right)^2}$$

де  $\vec{X}, \vec{Y}$  – тангенціальний та бітангенціальний вектори відповідно,  $\alpha_{gx}, \alpha_{gy}$  – шорсткість поверхні у напрямках  $\vec{X}, \vec{Y}$ .

Коефіцієнт Френеля моделі розраховується згідно з апроксимацією Шліка [10]

$$F = F_0 + (1 - F_0)(1 - \vec{V} \cdot \vec{H})^5, \quad (8)$$

де  $F_0$  спекулярне відбиття при нормальному падінні світла.

Функція ослаблення світла для GGX-розподілу обчислюється згідно з виразом [13]

$$G = G_1(\vec{L}, \vec{m}) \cdot G_1(\vec{V}, \vec{m}), \quad (9)$$

де  $\vec{m}$  – нормаль мікрофасети,

$$G_1(\vec{u}, \vec{m}) = x^+ \left( \frac{\vec{u} \cdot \vec{m}}{\vec{u} \cdot \vec{N}} \right) \cdot \frac{2}{1 + \sqrt{1 + a_g^2 \frac{1 - (\vec{N} \cdot \vec{u})^2}{(\vec{N} \cdot \vec{u})^2}}}$$

Окрім того, у знаменнику моделі замість  $\pi$  використовується 4.

Моделі даного типу дозволяють високореалістично відтворити відбивні властивості поверхонь більшості матеріалів, однак не є універсальними та можуть бути затратними в інтерактивних системах рендерингу реального часу.

Багатошарові матеріали, а також тканини, волосся належать до основних матеріалів, що потребують використання спеціальних ДФВЗ.

Для моделювання відбивних властивостей волосся найбільш часто використовуються спеціальні мікрофасетні та мікроциліндричні моделі.

Поширеною мікрофасетною ДФВЗ для тканин є ДФВЗ Нобелта-Петтінео, що побудована на основі ДФВЗ Ашикмина-Премоза та використовується згідно з формулою [9]

$$(1 - F) \frac{k_d}{\pi} + \frac{F}{4 \left( \vec{N} \cdot \vec{L} + \vec{N} \cdot \vec{V} - (\vec{N} \cdot \vec{L})(\vec{N} \cdot \vec{V}) \right)} \cdot \frac{\chi^+(\vec{N} \cdot \vec{m})}{\pi(1 + k_{amp} \alpha^2)} \left( 1 + \frac{k_{amp} \exp\left(\frac{((\vec{N} \cdot \vec{m})^2)}{\alpha^2((\vec{N} \cdot \vec{m})^2 - 1)}\right)}{(1 - \vec{N} \cdot \vec{m})^2} \right), \quad (10)$$

де  $\vec{m}$  – нормаль мікрофасети,  $k_{amp}$  – параметр контролю амплітуди Гауссівського розподілу.

Відомою мікроциліндричною ДФВЗ для тканин є ДФВЗ Каджия-Кей, оригінально призначена для волосся. Модель Каджия-Кей обчислюється згідно із виразом [14]

$$k_d \frac{1 - (\vec{T} \cdot \vec{L})^2}{\sqrt{1 - (\vec{T} \cdot \vec{L})^2}} + k_s \cos^n(\vec{T} \cdot \vec{L}) - x_{TV}, \quad (11)$$

де  $\vec{T}$  – тангенціальний вектор,  $x_{TV}$  – кут між  $\vec{T}, \vec{V}$ .

Для волосся базовою є ДФВЗ Маршнера [9], що враховує складові  $R$  (відбиття світла на межі між повітрям і волокном волосся),  $TT$  (випромінювання з середовища повітря, що пройшло по волокні волосся та вийшло назовні),  $TRT$  (випромінювання з повітряного середовища, що пройшло по волокні волосся, відбилось, пройшло по волокні та вийшло назовні). Зокрема, на основі зазначених компонент побудовано модель Хуанга [15]. Складові моделі відбиття світла Хуанга  $S_R, S_{TT}, S_{TRT}$  обчислюються за формулами

$$S_R = \frac{F(\vec{H}_1, \vec{V})}{8(\vec{N} \cdot \vec{L})(\vec{N} \cdot \vec{V})} \cdot \int D(\vec{H}_1, \vec{m}_1) G(\vec{L}, \vec{V}) d\phi_{m_1}, \quad (12)$$

де  $\vec{m}_1$  – нормаль макроповерхні,  $\phi$  позначає азимутальний кут відповідного спроектованого вектора;

$$S_{TT} = \frac{1}{2(\vec{N} \cdot \vec{L})(\vec{N} \cdot \vec{V})} \cdot \int \frac{T_1 T_2}{\|\vec{H}_1\|^2 \|\vec{H}_2\|^2} |\vec{L} \cdot \vec{H}_1| |\vec{w}_t \cdot \vec{H}_1| |\vec{V} \cdot \vec{H}_2| |\vec{w}_t \cdot \vec{H}_2| \cdot \int \frac{D_1 D_2 G_1 G_2 A_t}{|\vec{w}_t \cdot \vec{m}_1|} d\phi_{m_1} d\omega_t, \quad (13)$$

де  $T$  – коефіцієнт френелівського пропускання світла,  $\vec{w}_t$  – вектор пропущеного крізь волосину світла,  $A_t$  – складова поглинання світла пігментами волосся у напрямку  $\vec{w}_t$ ,

$$\vec{H}_1 = -\vec{L} - \eta \vec{w}_t$$

$\eta$  – коефіцієнт заломлення світла,  $\vec{H}_2 = -\vec{w}_t + \frac{\vec{V}}{\eta}$ ;

$$S_{TRT} = \frac{1}{8(\vec{N} \cdot \vec{L})(\vec{N} \cdot \vec{V})} \cdot \int \frac{T_1}{\|\vec{H}_1\|^2} |\vec{w}_t \cdot \vec{H}_1| |\vec{L} \cdot \vec{H}_1| \cdot \int \frac{F_2 T_3}{\|\vec{H}_3\|^2} |\vec{w}_{tr} \cdot \vec{H}_3| |\vec{V} \cdot \vec{H}_3|$$

$$\int \frac{D_1 D_2 D_3 G_1 G_2 G_3 A_t A_{tr}}{|\vec{w}_{tr} \cdot \vec{m}_1| |\vec{w}_{tr} \cdot \vec{m}_2|} d\phi_{m_1} d\omega_{tr} d\omega_t, \quad (14)$$

де  $\vec{w}_{tr}$  – відбитий пропущений через волокно промінь,  $A_{tr}$  – складова поглинання світла пігментами волосся у напрямку  $\vec{w}_{tr}$ ,  $\vec{H}_3 = \vec{\omega}_{tr} + \frac{\vec{v}}{\eta}$ .

Індекси 1,2,3 відповідають випадкам взаємодії світла з волосиною ( $R, TT, TRT$  відповідно).

Базовими моделями відбиття світла для багатошарових поверхонь є моделі Кубелка-Манк і Ханрахана-Крюгера. Однак, дані моделі не мають закритої математичної форми [16], тому їхнє використання для формування зображень є обмеженим. Досить поширеними є прості моделі прозорого покриття, що використовуються для подання тонкого прозорого шару, нанесеного на поверхню базового матеріалу. Зокрема, модель відбиття Disney включає за потреби спекулярну компоненту прозорого шару. Для багатошарових поверхонь використовуються більш складні та гнучкі моделі відбиття, як ДФВЗ Вейдліча-Вілкі та Белкура.

Модель Вейдліча-Вілкі [17] дозволяє моделювати відбиття світла при довільній кількості змін середовища. Для цього застосовується комбінація ДФВЗ  $f_{r0}, f_{r1}$

$$f_{r0}(\vec{L}_0, \vec{V}_0) + T_{01} f_{r1}(\vec{L}_1, \vec{V}_1) \cdot \exp(-\sigma_a d(1/|\vec{N} \cdot \vec{L}_1| + 1/|\vec{N} \cdot \vec{V}_1|)) \cdot ((1 - G) + T_{10} G) \quad (15)$$

$\sigma_a$  – коефіцієнт поглинання,  $d$  – глибина шару,  $T$  – коефіцієнти проходження Френеля. Багаторазова зміна середовища моделюється за рахунок рекурсивного виклику  $f_{r1}(\vec{L}_1, \vec{V}_1)$ .

Модель Белкура [17], на відміну від моделі Вейдліча-Вілкі, забезпечує врахування багаторазового розсіювання світла. Модель поєднує суму спекулярних складових на основі GGX-розподілу

$$\sum_{k=0}^{K-1} e_k(\vec{L}_0) \rho_k(\vec{L}_0, \vec{V}_0, \alpha_k(\vec{L}_0)), \quad (16)$$

де  $e_k$  – просторово-залежна енергія окремої спекулярної пелюстки,  $\rho_k$  – мікрофасетна ДФВЗ з GGX-розподілом,  $\alpha_k$  – просторово-залежна шорсткість GGX-розподілу.

Отже, кожна з наявних ДФВЗ має власні особливості застосування, залежно від характеристик матеріалу поверхні об'єкта та обчислювальних можливостей графічної системи.

Внаслідок цього, важливим є розвиток концепції адаптивного вибору ДФВЗ [18].

Основні положення концепції є наступними:

- 1) для кожного типу матеріалу здійснюється вибір відповідної ДФВЗ;
- 2) застосовуються комбінації ДФВЗ, наприклад, моделей для дифузних і спекулярних поверхонь;
- 3) враховується залежність ДФВЗ від особливостей текстури поверхні.

Типові основні етапи адаптивного вибору ДФВЗ включають: аналіз сцени, налаштування параметрів і вибір ДФВЗ, рендеринг. Спершу, система аналізує властивості кожного об'єкта у сцені, визначає їх матеріали. Далі, відповідно до характеристик матеріалу, налаштовуються параметри, як шорсткість, коефіцієнти дзеркального та дифузного відбиття. Обирається відповідна ДФВЗ. Після цього, сцена візуалізується з використанням обраних моделей.

Застосування адаптивного вибору ДФВЗ дозволяє забезпечити оптимальну продуктивність системи рендерингу та максимально реалістичне відтворення кожного матеріалу. Тому розробка методів адаптивного вибору ДФВЗ є актуальною.

### Метод адаптивного вибору ДФВЗ

Адаптивний підбір двопроревої функції відбивної здатності для матеріалу запропоновано здійснювати згідно із блок-схемою на рисунку 2. Спершу зі спеціальних таблиць для матеріалу визначаються  $n, \alpha, k_d, k_s$ .

Після отримання табличних характеристик матеріалу визначається головна мета формування зображення – високопродуктивність або фотореалістичність.

Високопродуктивне формування зображення застосовується, коли мають місце суттєві часові та апаратні обмеження рендерингу сцени (наприклад, візуалізація кадрів інтерактивних мобільних ігор).

Якщо наявні достатні обчислювальні ресурси для врахування мікроструктури та складних оптичних властивостей поверхні об'єкта, формуються фотореалістичні зображення (наприклад, при розробці кадрів мультфільму або візуалізації кадрів гри на потужному ігровому комп'ютері).

У випадку високопродуктивної візуалізації сцени запропоновано використовувати найпростіші дифузні та спекулярні моделі:

- 1) освітлення – Ламберта (формула (1));
  - 2) Блінна-Фонга (формула (4))
- відповідно.

При цьому, модель Блінна-Фонга за можливості апроксимується більш простою. Для цього, перевіряється наявність апроксимаційних виразів зі степенем, меншим за  $n$  (таблиця 1).



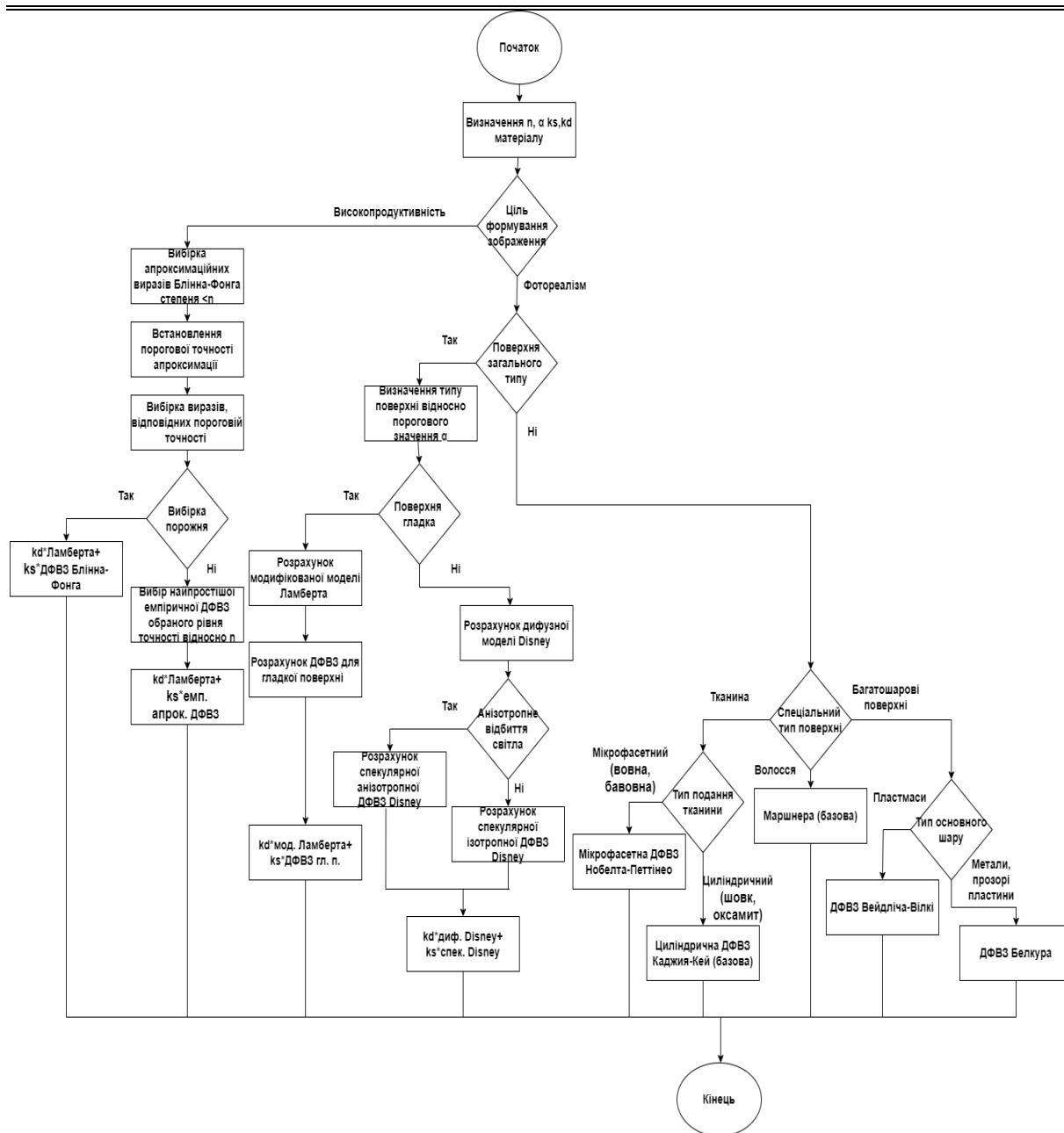


Рисунок 2 – Блок-схема адаптивного вибору ДФВЗ для матеріалу

Таблиця 1 – Апроксимаційні вирази моделі Блінна-Фонга [4, 19-22]

Модель	Позначення	Формула
Косинус-степеневая 2 степеня	$f_2$	$\left(\frac{n}{2}(\cos(\theta)-1) + 1\right)^2$
Косинус-степеневая 4 степеня	$f_4$	$\left(\frac{n}{4}(\cos(\theta)-1) + 1\right)^4$
Косинус-степеневая 8 степеня	$f_8$	$\left(\frac{n}{8}(\cos(\theta)-1) + 1\right)^8$
Косинус-степеневая 16 степеня	$f_{16}$	$\left(\frac{n}{16}(\cos(\theta)-1) + 1\right)^{16}$
Шліка	$f_s$	$\frac{\cos(\theta)}{n - n \cdot \cos(\theta) + \cos(\theta)}$
Квадратична	$f_{kv}$	$0.786n \cdot \cos(\theta)^2 + (1 - 0.786n) \cdot \cos(\theta)$
Кубічна	$f_{kub}$	$A \cdot \cos(\theta)^3 + B \cdot \cos(\theta)^2 + C \cdot \cos(\theta)$ (A, B, C - табличні коефіцієнти)

Обирається допустимий рівень відносної (таблиця 2) та абсолютної (таблиця 3) похибки апроксимації оригінальної моделі.

Серед виразів, які відповідають обраному рівню похибки апроксимації, обирається формула, що найбільш просто обчислюється. Простоту

формули запропоновано визначати на основі кількості тактів операцій процесора AMD Zen4 (2022), наведених у таблиці 4. Також, у таблиці наведено додаткові апаратні затрати на розрахунок спрощених моделей.

Таблиця 2 – Максимальні відносні похибки (%) апроксимаційних моделей Блінна-Фонга від оригінальної моделі у зоні епіцентру відблиску

Модель/n	2	5	10	20	50	100	200	500	700	1000
$f_2$	0	5	6.5	7	7	7	7	7	7	7
$f_4$	6	1	2	3	3	3	3	3	3	3
$f_8$	9	1	0.5	1	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
$f_{16}$	10	2	0.5	0.25	0.5	0.5	0.75	0.75	0.75	0.75
$f_s$	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$f_{kv}$	23	8	4	2	3	3	3	3	3	3
$f_{kub}$	0	1	2	2	2.5	3	3	3	3	3

Таблиця 3 – Максимальні абсолютні похибки апроксимаційних моделей Блінна-Фонга від оригінальної моделі

Модель/n	2	5	10	20	50	100	200	500	700	1000
$f_2$	0	0.11	0.14	0.15	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
$f_4$	0.09	0.02	0.05	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
$f_8$	0.13	0.02	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
$f_{16}$	0.15	0.04	0.01	0.003	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
$f_s$	0.09	0.16	0.18	0.19	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
$f_{kv}$	0.15	0.23	0.25	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
$f_{kub}$	0	0.02	0.05	0.07	0.09	0.1	0.1	0.1	0.11	0.11

Таблиця 4 – Кількість тактів операцій процесора AMD Zen4 для розрахунку апроксимаційних моделей Блінна-Фонга

Модель	ADD тактів	$N_{op}$ (число операцій)	MUL тактів	$N_{op}$	DIV тактів	$N_{op}$	Всього тактів	Додаткові ресурси
$f_2$	1	2	3	2	10	0	8	Збереження 1000 координат точки, після якої необхідне обнулення функції або +10 тактів на її розрахунок
$f_4$		2		3		0	11	
$f_8$		2		4		0	14	
$f_{16}$		2		5		0	17	
$f_{kub}$		2		5		0	17	
$f_{kv}$		2		4		0	14	
$f_s$		2		1		1	15	-

Якщо апроксимаційні вирази характеризуються похибкою апроксимації, яка перевищує порогову, використовується модель Блінна-Фонга.

Обрана спекулярна модель і модель Ламберта поєднуються при розрахунку

інтенсивності кольору пікселя із врахуванням визначених для матеріалу значень  $k_d, k_s$ .

Якщо обчислювальні можливості системи рендерингу дозволяють формувати фотореалістичні зображення на основі складних моделей відбивної здатності, запропонована схема

передбачає різні варіанти розрахунку ДФВЗ для поверхонь загального типу, а також для волосся, тканин, багат шарових матеріалів.

Для поверхні загального типу доцільним є визначення її класу шорсткості (гладка або шорстка) відносно параметра  $\alpha$ .

Пропонується використання ДФВЗ Disney (формули (5)-(6), (8)-(9)) для подання спекулярних властивостей шорстких поверхонь загального типу. ДФВЗ Disney включає використання GGX-розподілу у якості  $D$  для головної спекулярної пелюстки, що порівняно з іншими відомими розподілами, як Бекмана, характеризується вужчими спекулярними піками (епіцентрами відблисків) та довшими зонами затухання навколо них [9]. Завдяки цьому, підвищується реалістичність візуалізації об'єктів і дана модель є основною у сучасних програмних засобах тривимірної графіки, як Blender [23].

Відповідно, для подання анізотропного відбиття світла від шорстких поверхонь загального типу, доцільним є використання анізотропної версії  $D$  моделі Disney (формула (7)).

Оскільки у випадку шорстких поверхонь складової кольору запропоновано спекулярну складову моделі Disney, то доцільним є також використання дифузної складової моделі Disney (формула (3)). Дифузна модель Disney, хоч і є простішою, ніж ДФВЗ Орена-Найяра, проте характеризується більшою гнучкістю та більш точною апроксимацією вимірних наборів відбивних здатностей матеріалів [24].

Далі, розглянемо випадок, коли поверхня об'єкта фактично є гладкою. Для подання дифузного відбиття світла пропонується використання модифікованої моделі Ламберта (формула (2)). Дана модель є широко поширеною та не враховує параметр шорсткості поверхні. Передбачається, що мікрограні поверхні є меншими, ніж масштаб розсіювання світла, тому поверхня вважається гладкою.

Для спекулярної складової моделі відбиття запропоновано використовувати просту ДФВЗ, що не враховує мікроструктуру поверхні й, відповідно, параметр шорсткості. Якщо шорсткість поверхні є низькою, можливе отримання високореалістичного зображення без зайвих обчислень розподілу мікрофасет.

Визначимо рівень шорсткості поверхні, при якому застосування емпіричної ДФВЗ замість мікрофасетної ДФВЗ не призводить до суттєвих відмінностей між сформованими зображеннями.

Для цього розглянемо використання (таблиця 5) енергетично-коректної ДФВЗ Фонга ( $f_{PHE}$ ) [25], енергетично-коректної ДФВЗ Блінна-Фонга ( $f_{BE}$ ) [26], енергетично-коректної косинус-квадратичної ДФВЗ ( $f_{2E}$ ) [22], енергетично-коректної косинус-степеневі ДФВЗ 16 степеня ( $f_{16E}$ ) [25]. Проаналізуємо застосування більш

складних емпіричних моделей, що включають розрахунок фактора Френеля, наприклад, енергетично-коректної ДФВЗ Готанда ( $f_{GE}$ ) [27]. Такі моделі можна вважати окремим випадком ДФВЗ Кука-Торренса, де у якості розподілу мікрофасет  $D$  використовуються прості ДФВЗ (наприклад, Фонга), а  $G = 1$  (відсутнє затінення мікрофасет). Зокрема, було розглянуто випадки ДФВЗ Кука-Торренса при  $D = f_{PHE}$  ( $f_{STRHE}$ ),  $D = f_{2E}$  ( $f_{ST2E}$ ),  $D = f_{16E}$  ( $f_{ST16E}$ ), коли  $G = 1$ .

Таблиця 5 – Вирази-кандидати для заміни мікрофасетних ДФВЗ при малій шорсткості поверхні

Модель	Формула
$f_{PHE}$	$\left(\frac{n+2}{2\pi}\right) \cos(\gamma)^n$
$f_{BE}$	$\frac{(n+2)(n+4)}{8\pi\left(2^{-\frac{n}{2}}+n\right)} \cos(\theta)^n$
$f_{2E}$	$\left(\frac{0.111}{n} + 0.238 \cdot (0.481 + n)\right) \cdot \left(\frac{n}{2}(\cos(\gamma)-1) + 1\right)^2$
$f_{16E}$	$\frac{(1.063n+1)}{2\pi} \left(\frac{n}{16}(\cos(\theta)-1) + 1\right)^{16}$
$f_{GE}$	$\frac{(n+2)}{4\pi\left(2-2^{-\frac{n}{2}}\right)} \frac{F(F_0) \cos(\theta)^n}{\max(\cos(\theta_i), \cos(\theta_o))}$
$f_{STRHE}$	$\frac{\left(\frac{n+2}{2\pi}\right) \cos(\gamma)^n F}{4 \cos \theta_i \cos \theta_o}$
$f_{ST2E}$	$\frac{\left(\left(\frac{0.111}{n} + 0.238 \cdot (0.481 + n)\right) \cdot \left(\frac{n}{2}(\cos(\gamma)-1) + 1\right)^2 F\right)}{4 \cos \theta_i \cos \theta_o}$
$f_{ST16E}$	$\frac{\frac{(1.063n+1)}{2\pi} \left(\frac{n}{16}(\cos(\gamma)-1) + 1\right)^{16} F}{4 \cos \theta_i \cos \theta_o}$

Дослідження впливу заміни мікрофасетної ДФВЗ на емпіричну при малій шорсткості поверхні здійснено за допомогою програмного засобу BRDF Explorer. При дослідженні використано тестову фігуру «Робот» (рисунок 3).

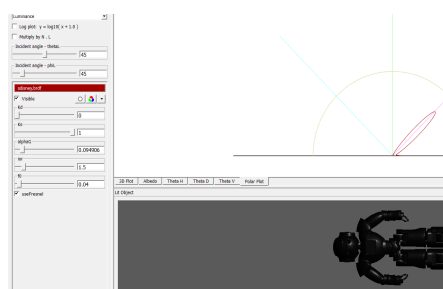


Рисунок 3 – Візуалізація тестової фігури «Робот» у BRDF Explorer

Для спекулярної складової ДФВЗ Disney було розглянуто рівні шорсткості поверхні  $\alpha_g$

$$1; \frac{9}{10}; \frac{8}{10}; \frac{7}{10}; \frac{6}{10}; \frac{5}{10}; \frac{4}{10}; \frac{3}{10}; \frac{2}{10}; \frac{1}{10}; \frac{1}{20}; \frac{1}{100};$$

$$\frac{1}{200}; \frac{1}{1000}; \frac{1}{2000}; \frac{1}{10000}; \frac{1}{20000}$$

Відносно зазначених рівнів шорсткості було сформовано зображення тестової фігури. Зображення на основі емпіричних ДФВЗ-кандидатів було отримано для таких значень:

$$n: 1; 5; 10; 20; 40; 60; 80; 100; 200; 300; 400;$$

$$n: 500; 600; 700; 800; 900; 950; 1000.$$

Для кожного рівня шорсткості визначено найменше відхилення між зображенням на основі мікрофасетної моделі та зображенням на основі

емпіричної моделі відносно зазначених значень  $n$ . Для цього було використано метрику NMSE [28]

$$\frac{\sum_i (R_1(i) - R_2(i))^2 + (G_1(i) - G_2(i))^2 + (B_1(i) - B_2(i))^2}{\sum_i R_1(i)^2 + G_1(i)^2 + B_1(i)^2}, \text{ де}$$

$R, G, B$  відповідно є інтенсивностями кольору пікселя для каналів моделі RGB,  $i$  - номер пікселя зображення, індекс 1 відповідає сталонному зображенню, індекс 2 відповідає зображенню на основі більш простої моделі відбиття світла.

У таблиці 6 наведено мінімальні значення NMSE при візуалізації тестової фігури на основі моделей  $f_{PHE}, f_{BE}, f_{2E}, f_{16E}$ .

У таблиці 7 наведено мінімальні значення NMSE при візуалізації тестової фігури на основі моделей  $f_{GE}, f_{STRHE}, f_{CT2E}, f_{CT16E}$ .

Таблиця 6 – Мінімальні значення NMSE при візуалізації фігури «Робот» на основі моделей  $f_{PHE}, f_{BE}, f_{2E}, f_{16E}$  для окремих рівнів шорсткості поверхні

$\alpha_g$	$\alpha$	Мінімальне NMSE ( $f_{PHE}$ )	Мінімальне NMSE ( $f_{BE}$ )	Мінімальне NMSE ( $f_{2E}$ )	Мінімальне NMSE ( $f_{16E}$ )
1.0	1.000	0.0554	0.0383	0.0517	0.0430
0.9	0.9487	0.0576	0.0341	0.0596	0.0427
0.8	0.8944	0.0589	0.0305	0.0577	0.0432
0.7	0.8367	0.0543	0.0283	0.0555	0.0421
0.6	0.7746	0.0542	0.0272	0.0558	0.0436
0.5	0.7071	0.0545	0.0268	0.0548	0.0452
0.4	0.6325	0.0491	0.0282	0.0472	0.0473
0.3	0.5477	0.0419	0.0275	0.0465	0.0508
0.2	0.4472	0.0330	0.0271	0.0445	0.0410
0.1	0.3162	0.0195	0.0252	0.0322	0.0264
0.05	0.2236	0.0099	0.0139	0.0190	0.0150
0.01	0.1000	0.0018	0.0027	0.0031	0.0028
0.005	0.0707	0.0008	0.0017	0.0015	0.0013
0.001	0.0316	0.0004	0.0012	0.0003	0.0003
0.0005	0.0224	0.0004	0.0011	0.0001	0.0002
0.0001	0.0100	0.0003	0.0010	0.00003	0.0002
0.00005	0.0071	0.0003	0.0010	0.00001	0.0002
0.00001	0.0032	0.0003	0.0010	0.000002	0.0002

Таблиця 7 – Мінімальні значення NMSE при візуалізації фігури «Робот» на основі використанні моделей  $f_{GE}, f_{STRHE}, f_{CT2E}, f_{CT16E}$  для окремих рівнів шорсткості поверхні

$\alpha_g$	$\alpha$	Мінімальне NMSE ( $f_{GE}$ )	Мінімальне NMSE ( $f_{STRHE}$ )	Мінімальне NMSE ( $f_{CT2E}$ )	Мінімальне NMSE ( $f_{CT16E}$ )
1.0	1.000	0.0075	0.0109	0.0052	0.0047
0.9	0.9487	0.0050	0.0108	0.0042	0.0060
0.8	0.8944	0.0031	0.0113	0.0045	0.0087
0.7	0.8367	0.0020	0.0125	0.0063	0.0131
0.6	0.7746	0.0020	0.0142	0.0099	0.0194
0.5	0.7071	0.0037	0.0167	0.0159	0.0261

Продовження таблиці 7

$\alpha_g$	$\alpha$	Мінімальне NMSE ( $f_{GE}$ )	Мінімальне NMSE ( $f_{STRHE}$ )	Мінімальне NMSE ( $f_{CT2E}$ )	Мінімальне NMSE ( $f_{CT16E}$ )
0.4	0.6325	0.0042	0.0204	0.0199	0.0273
0.3	0.5477	0.0061	0.0200	0.0221	0.0267
0.2	0.4472	0.0082	0.0185	0.0270	0.0176
0.1	0.3162	0.0096	0.0082	0.0159	0.0060
0.05	0.2236	0.0077	0.0042	0.0136	0.0076
0.01	0.1000	0.0017	0.0016	0.0032	0.0026
0.005	0.0707	0.0010	0.0008	0.0013	0.0012
0.001	0.0316	0.0009	0.0002	0.0002	0.0003
0.0005	0.0224	0.0009	0.0003	0.0001	0.0002
0.0001	0.0100	0.0009	0.0003	0.0001	0.0002
0.00005	0.0071	0.0009	0.0003	0.0001	0.0002
0.00001	0.0032	0.0009	0.0003	0.00004	0.0002

При визначенні ступеня візуальних відмінностей між еталонними зображеннями та зображеннями на основі простих моделей відбиття світла було використано таблицю 8 [28]. Дана таблиця містить відповідності між значенням NMSE і рівнем візуальних відмінностей.

Таблиця 8 – Значення NMSE при порівнянні зображення з еталонним [28]

Значення NMSE	Рівень відмінностей між зображеннями
<0.0001	Візуальні відмінності відсутні
0.0001 – 0.00025	Наявні незначні візуальні відмінності
0.00025-0.001	Наявні помітні візуальні відмінності
>0.001	Зображення суттєво відрізняються

Отже, при великій та середній шорсткості  $\alpha_g$  використання більш складних моделей відбиття світла (див. табл. 7) забезпечує формування зображень, більш схожих на еталонні. Однак, при невеликих значеннях шорсткості  $\alpha_g$  для простих емпіричних моделей (див. табл. 6) і емпіричних ДФВЗ на основі моделі Кука-Торренса (див. табл. 7) втрати у якості візуалізації зображень є приблизно однаковими.

При цьому, найменше значення NMSE (0.000002) досягається при використанні енергетично-коректної косинус-квадратичної ДФВЗ  $f_{2E}$ . При  $\alpha_g = 0.001$  ( $\alpha = 0.0316$ ) NMSE відповідає помітним, однак несуттєвим відмінностям між зображеннями, при  $\alpha_g = 0.0005$  ( $\alpha = 0.0224$ ) NMSE відповідає незначним відмінностям між зображеннями, при  $\alpha_g \leq 0.0001$  ( $\alpha \leq 0.0100$ ) відмінності між зображеннями є непомітними.

На рисунку 4 наведено порівняльні зображення візуалізованої тестової фігури «Робот»

при використанні спекулярної складової моделі Disney ( $\alpha_g = 0.1$ ,  $\alpha_g = 0.001$ ,  $\alpha_g = 0.00001$ ) і при застосуванні енергетично-коректної косинус-квадратичної моделі ( $n = 800$ ,  $n = 900$ ,  $n = 1000$ ). Візуалізацію фігур здійснено у BRDF Explorer.

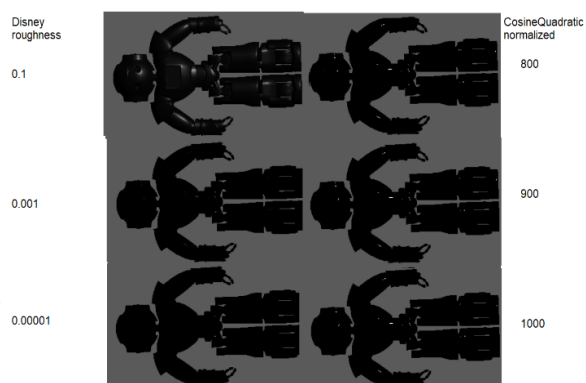


Рисунок 4 – Порівняння результатів візуалізації тестової фігури на основі спекулярної ДФВЗ Disney та енергетично-коректної косинус-квадратичної ДФВЗ для окремих рівнів  $\alpha_g$ ,  $n$

Отже, для подання спекулярного відбиття світла від гладких поверхонь при  $\alpha \leq 0.03$  рекомендовано використовувати енергетично-коректну косинус-квадратичну ДФВЗ. Дифузна та спекулярна моделі відбиття світла від гладкої поверхні поєднуються за допомогою коефіцієнтів  $k_d, k_s$ . Для шорстких тканин, таких як вовна, бавовна, доцільним є використання мікрофасетної ДФВЗ Нобелта-Петтінео (формула (10)), що встановлено практичними дослідженнями науковців з компанії Naughty Dog [29]. Дана модель широко використовується, зокрема компаніями Ready at Dawn's, Naughty Dog та у графічному рендерері Filament.

Для блискучих тканин, як шовк і оксамит, доцільним є використання мікроциліндричної ДФВЗ Каджия-Кей [29] (формула (11)). Дослідниками з Naughty Dog встановлено, що застосування обчислювально складніших мікрофасетних моделей забезпечує дещо точніше відтворення візуальних властивостей матеріалів. Однак, перевага у більшості випадків є непомітною. Для волосся запропоновано використання ДФВЗ Хуанга (формули (12)-(14)), що є однією з найновіших ДФВЗ даного типу та базується на складових ДФВЗ Маршнера та є основою моделі відбиття світла від волосся у Blender [30].

Для рекомендації ДФВЗ для багатошарових поверхонь враховано результати дослідів М. Баті та ін. [17], де було порівняно застосування ДФВЗ Вейдліча-Вілкі (формула (15)) і Белкура (формула (16)). У якості основних поверхонь розглядалися пластмаси, прозорі пластини, метали. Для пластмас доцільним є використання моделі Вейдліча-Вілкі [17], оскільки модель Белкура є спекулярною. Для прозорих пластин доцільним є використання моделі Белкура [17], оскільки необхідним є

врахування багаторазового розсіювання світла. При моделюванні освітлення поверхонь металів визначено, що модель Белкура є більш точною [17]. Особливо проблемним є використання моделі Вейдліча-Вілкі, коли гладкий метал покрито шорстким додатковим шаром.

### Висновки

У статті запропоновано метод адаптивного вибору моделі відбивної здатності поверхні. Алгоритм базується на попередньому визначенні відбивних властивостей матеріалів і може бути застосований як для забезпечення високопродуктивного рендерингу, так і для фотореалістичної візуалізації тривимірних сцен. У випадку високопродуктивного рендерингу метод дозволяє обрати найбільш продуктивну модель прийнятого рівня точності. У випадку високореалістичного рендерингу метод забезпечує оптимальний вибір моделей відбиття для різних типів поверхні і дозволяє усунути зайві обчислювальні витрати при візуалізації гладких поверхонь.

### Список літератури

1. Романюк О.Н. Комп'ютерна графіка / О.Н. Романюк, О.В. Романюк, Р.Ю. Чехмestruc. Вінниця : ВНТУ, 2023. 147 с.
2. Романюк О.Н. Класифікація дистрибутивних функцій відбивної здатності поверхні / О.Н. Романюк // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. 2008. № 9. С. 145–151.
3. The Development of Physically Correct Reflectance Model Based on Logarithm Function / Olexandr Romanyuk, et al. // 2023 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Wrocław, Poland, 21–23 September 2023. [S. l.], 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/acit58437.2023.10275589> (date of access: 02.10.2024).
4. New surface reflectance model with the combination of two cubic functions usage / Oleksandr Romanyuk, et al. // Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska. 2023. Vol. 13, no. 3. P. 101–106. URL: <https://doi.org/10.35784/iapgos.5327> (date of access: 02.10.2024).
5. Optical system visualization of combined reflectance model based on cubic and quadratic functions / Oleksandr Romanyuk, et al. // Optical Fibers and Their Applications 2023, Lublin, Poland, 11–14 September 2023 / ed. by Z. Omiotek, A. Smolarz, W. Wójcik. [S. l.], 2023. URL: <https://doi.org/10.1117/12.3023138>.
6. Романюк О.Н. Аналіз нових моделей освітлення на основі двопробневих функцій відбивної здатності / О.Н. Романюк, Є.К. Завальнюк, О.Л. Бобко // Україна та світ: сучасні парадигми розвитку суспільства. Харків, 2024. С. 16–39.
7. BRDF Representation and Acquisition / D. Guarnera, et al. // Computer Graphics Forum. 2016. Vol. 35, no. 2. P. 625-650. URL: <https://doi.org/10.1111/cgf.12867> (date of access: 02.10.2024).
8. Boksansky J. Crash Course in BRDF Implementation / J. Boksansky // ResearchGate. URL: [https://www.researchgate.net/profile/Jakub-Boksansky/publication/350052593\\_Crash\\_Course\\_in\\_BRDF\\_Implementation/links/604e0290a6fdcccfee7d9a9c/Crash-Course-in-BRDF-Implementation.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jakub-Boksansky/publication/350052593_Crash_Course_in_BRDF_Implementation/links/604e0290a6fdcccfee7d9a9c/Crash-Course-in-BRDF-Implementation.pdf) (date of access: 02.10.2024).
9. Akenine-Möller T. Real-Time Rendering / Tomas Akenine-Möller. Fourth edition. Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press. A K Peters/CRC Press, 2018. URL: <https://doi.org/10.1201/b22086>.
10. Burley B. Physically-based shading at Disney. DisneyAnimation. URL: [https://media.disneyanimation.com/uploads/production/publication\\_asset/48/asset/s2012\\_pbs\\_disney\\_brdf\\_notes\\_v3.pdf](https://media.disneyanimation.com/uploads/production/publication_asset/48/asset/s2012_pbs_disney_brdf_notes_v3.pdf).
11. Microfacet distribution function for physically based bidirectional reflectance distribution functions / O. N. Romanyuk, et al. // Optical Fibers and Their Applications 2012, Krasnobrod, Poland. [S. l.], 2013. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2019338> (date of access: 02.10.2024).

12. Modification of existing methods of visualization of offset face skin structure / Sergey O. Romanyuk, et al. // *Optical Fibers and Their Applications 2020*, Białowieża, Poland, 27–31 January 2020 / ed. by R. S. Romaniuk, J. Dorosz. [S. l.], 2020. URL:<https://doi.org/10.1117/12.2569770> (date of access: 02.10.2024).
13. Dimov R. Deriving the Smith shadowing function  $G_1$  for  $\gamma \in (0, 4]$ , *Static.Chaos*. URL:[https://static.chaos.com/documents/assets/000/000/369/original/gtr\\_shadowing.pdf?1676451994](https://static.chaos.com/documents/assets/000/000/369/original/gtr_shadowing.pdf?1676451994).
14. Kajiya J. T. Rendering fur with three dimensional textures / J. T. Kajiya, T. L. Kay // *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*. 1989. Vol. 23, no. 3. P. 271–280. URL: <https://doi.org/10.1145/74334.74361> (date of access: 02.10.2024).
15. Huang W. A Microfacet-based Hair Scattering Model / W. Huang, M. B. Hullin, J. Hanika // *Computer Graphics Forum*. 2022. Vol. 41, no. 4. P. 79–91. URL:<https://doi.org/10.1111/cgf.14588> (date of access: 02.10.2024).
16. Weidlich A. Arbitrarily layered micro-facet surfaces / Andrea Weidlich, Alexander Wilkie // the 5th international conference, Perth, Australia, 1–4 December 2007. New York, New York, USA, 2007. URL:<https://doi.org/10.1145/1321261.1321292> (date of access: 02.10.2024).
17. Bati M. Comparative Study of Layered Material Models / Megane Bati, Romain Pacanowski, Pascal Barla // *Workshop on Material Appearance Modeling (2019)*, Strasbourg, France, 9 July 2019. URL: <https://hal.science/hal-02184562/file/main.pdf> (date of access: 02.10.2024).
18. The Concept and Means of Adaptive Shading / Olexandr Romanyuk, et al. // *2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Ruzomberok, Slovakia, 26–28 September 2022. [S. l.], 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/acit54803.2022.9913105> (date of access: 02.10.2024).
19. Combined bidirectional reflectance distribution functions usage for increasing images creation productivity / Oleksandr N. Romanyuk, et al. // *Applied Aspects of Information Technology*. 2023. Vol. 6, no. 2. P. 130–138. URL: <https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.9> (date of access: 02.10.2024).
20. Розробка модифікованої функції Шліка для визначення спекулярної складової кольору / Є. К. Завальнюк та ін. // *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2022. Вип. 55, no. 3. С. 4–12.
21. Romanyuk A. Effective Models for the Specular Color Constituent Computing / A. Romanyuk, Y. Lyashenko, A. Melnik, A. Goncharuk // *Journal of Computer Science and Engineering*. 2010. 2(2). P. 25–29.
22. Romanyuk A. Efficient Methods for Fast Shading / A. Romanyuk, A. Hast, Y. Lyashenko // *Advances in Electrical and Computer Engineering*— 2008. Vol. 8, no. 2. P. 82–85. URL:<https://doi.org/10.4316/aece.2008.02015> (date of access: 02.10.2024).
23. Принципове BSDF - Principled BSDF // Blender. URL: [https://docs.blender.org/manual/uk/2.82/render/shader\\_nodes/shader/principled.html](https://docs.blender.org/manual/uk/2.82/render/shader_nodes/shader/principled.html).
24. Oren-Nayar in the Principled BSDF shader // Blender. URL:<https://blenderartists.org/t/oren-nayar-in-the-principled-bsdf-shader/1531766> (date of access: 02.10.2024).
25. Моделювання спекулярного складника кольору з використанням енергетично-коректних моделей відбивних здатностей поверхонь / О. Романюк, І. Абрамчук, С. Кирилашук, С. Романюк // *Вчені записки ТНУ ім. В. І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2019. Том 30 (69), частина 1, no. 3. С. 153–157.
26. Giesen F. Phong Normalization Factor derivation / F. Giesen // *Farbrausch*. URL:<https://www.farbrausch.de/~fg/stuff/phong.pdf> (date of access: 02.10.2024).
27. Gotanda Y. Physically Based Shading Models in Film and Game Production: Practical Implementation at tri-Ace, Citeseer. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=a3ab6be33c1dfb85c36fa1bb3793cfda3401812>.
28. Romanyuk O. Deep Learning-Based Determination of Optimal Triangles Number of Graphic Objects Polygonal Model / O. Romanyuk, Y. Zavalniuk // *5th International Workshop on Intelligent Information Technologies and Systems of Information Security*, Khmelnytskyi, Ukraine, 28 March 2024.
29. Jiang Y. The Process of Creating Volumetric-based Materials in Uncharted 4 / Y. Jiang // *Advances.RealTimeRendering*. URL:<https://advances.realtimerendering.com/s2016/> (date of access: 02.10.2024).
30. Principled Hair BSDF // Blender. URL: [https://docs.blender.org/manual/en/dev/render/shader\\_nodes/shader/hair\\_principled.html](https://docs.blender.org/manual/en/dev/render/shader_nodes/shader/hair_principled.html).

### References

1. Romanyuk, O. N., Romanyuk, O. V. and Chekhmestruk, R. Yu. (2023), *Computer Graphics [Kompiuterna hrafika]*, Vinnytsia: VNTU, 147 p.
2. Romanyuk, O. N. (2008), "Classification of bidirectional reflectance distribution function" ["Klasyfikatsiia dystrybutyvykh funktsii vidbyvnoi zdatnosti poverkhni"], *Scientific papers of Donetsk National Technical University. Informatics, Cybernetics and Computer Science*, 9, pp. 145-151.
3. Romanyuk, O., Zavalniuk, Y., Romanyuk, O., Snigur, A., Titova, N. та Maidaniuk, V. (2023), "The Development of Physically Correct Reflectance Model Based on Logarithm Function", *2023 13th International*

*Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), 21–23 вересня 2023, Wrocław, Poland. IEEE*, available at: doi: 10.1109/acit58437.2023.10275589.

4. Romanyuk, O., Zavalniuk, Y., Pavlov, S., Chekhmestruk, R., Bondarenko, B., Koval, T., Kalizhanova, A. та Iskakova, A. (2023), "New surface reflectance model with the combination of two cubic functions usage", *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 13(3), pp. 101–106, available at: doi:10.35784/iapgos.5327.
5. Romanyuk, O., Zavalniuk, Y., Titova, N. V., Kaduk, O., Wójcik, W., Kalimoldayev, M. та Shermantayeva, Z. (2023), "Optical system visualization of combined reflectance model based on cubic and quadratic functions", *Z. Omiotek, A. Smolarz and W. Wójcik, ed. Optical Fibers and Their Applications 2023, 11–14 September 2024, Lublin, Poland*, SPIE, available at:doi: 10.1117/12.3023138.
6. Romanyuk, O. N., Zavalniuk, Ye. K., and Bobko, O. L. (2024), "Analysis of new lighting models based on bidirectional reflectance distribution functions" ["Analiz novykh modelei osvittennia na osnovi dvopromenevykh funktsii vidbyvnoi zdatnosti"], *Ukraine and world: modern paradigms of society development*, Kharkiv: "Novyi kurs", pp. 16–39.
7. Guarnera, D., Guarnera, G. C., Ghosh, A., Denk, C. та Glencross, M. (2016), "BRDF Representation and Acquisition", *Computer Graphics Forum*, 35(2), pp. 625–650, available at: doi: 10.1111/cgf.12867.
8. Boksansky, J. (2021), "Crash Course in BRDF Implementation", *ResearchGate*, available at: [https://www.researchgate.net/profile/Jakub\\_Boksansky/publication/350052593\\_Crash\\_Course\\_in\\_BRDF\\_Implementation/links/604e0290a6fdcccfee7d9a9c/Crash-Course-in-BRDF-Implementation.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jakub_Boksansky/publication/350052593_Crash_Course_in_BRDF_Implementation/links/604e0290a6fdcccfee7d9a9c/Crash-Course-in-BRDF-Implementation.pdf).
9. Akenine-Möller, T. (2018), "Real-Time Rendering", Fourth edition, Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2018.: A K Peters/CRC Press, available at: doi: 10.1201/b22086.
10. Burley, B. (2012), "Physically-based shading at Disney", *DisneyAnimation*, available at:[https://media.disneyanimation.com/uploads/production/publication\\_asset/48/asset/s2012\\_pbs\\_disney\\_brdf\\_notes\\_v3.pdf](https://media.disneyanimation.com/uploads/production/publication_asset/48/asset/s2012_pbs_disney_brdf_notes_v3.pdf).
11. Romanyuk, O. N., Pavlov, S. V., Dovhaliuk, R. Y., Babyuk, N. P., Obidnyk, M. D., Kisala, P. and Suleimenov, B. (2013), "Microfacet distribution function for physically based bidirectional reflectance distribution functions", *Optical Fibers and Their Applications 2012, Krasnobrod, Poland*, SPIE, available at: doi: 10.1117/12.2019338.
12. Romanyuk, S.O., Romanyuk, O.N., Pavlov, S.V., Romanyuk, O.V., Dobrovolska, N.V., Kravchenko, L.M., Tymchyk, S.V., Smolarz, A., Kulakova, O., Kalizhanova, A. and Amirgaliyeva, Z. (2020), "Modification of existing methods of visualization of offset face skin structure", *Optical Fibers and Their Applications 2020, January 27–31, 2020, Bialowieza, Poland*, SPIE, available at: doi: 10.1117/12.2569770.
13. Dimov, R., (2015), "Deriving the Smith shadowing function G1 for  $\gamma \in (0, 4]$ ", *Static.Chaos*, available at: [https://static.chaos.com/documents/assets/000/000/369/original/gtr\\_shadowing.pdf?1676451994](https://static.chaos.com/documents/assets/000/000/369/original/gtr_shadowing.pdf?1676451994).
14. Kajiya, J. T. and Kay, T. L. (1989), "Rendering fur with three dimensional textures", *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 23(3), pp. 271–280, available at: doi: 10.1145/74334.74361.
15. Huang, W., Hullin, M. B. and Hanika, J. (2022), "A Microfacet-based Hair Scattering Model", *Computer Graphics Forum*, 41(4), pp. 79–91, available at: doi: 10.1111/cgf.14588.
16. Weidlich, A. and Wilkie, A. (2007), "Arbitrarily layered micro-facet surfaces", *5th international conference, 1–4 грудня 2007, Perth, Australia, New York, USA: ACM Press*, available at: doi: 10.1145/1321261.1321292.
17. Bati, M., Pacanowski, R., Barla, P. (2019), "Comparative Study of Layered Material Models", *Workshop on Material Appearance Modeling, Strasbourgh, France*, available at: <https://hal.science/hal-02184562/file/main.pdf>.
18. Romanyuk, O., Romanyuk, O., Chekhmestruk, R., Mykhaylov, P., Maidaniuk, V. and Korobeinikova, T. (2022), "The Concept and Means of Adaptive Shading", *12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), September 26–28, 2022, Ruzomberok, Slovakia*, IEEE, available at: doi: 10.1109/acit54803.2022.9913105.
19. Romanyuk, O. N., Zavalniuk, Y. K., Chekhmestruk, R. Y., Mykhaylov, P. I. and Achanyar, H. (2023), "Combined bidirectional reflectance distribution functions usage for increasing images creation productivity", *Applied Aspects of Information Technology*, 6(2), pp. 130–138, available at: doi: 10.15276/aait.06.2023.9.
20. Zavalniuk, Y. K., Romanyuk, O. N., Voitko, V.V., Romanyuk, O.V. and Snigur, A.V. (2022), "Development of the modified Schlick reflectance model for the specular color component



- calculation", *Information technologies and computer engineering*, 55(3), pp. 4–12, available at: doi: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2022-55-3-4-1>.
21. Romanyuk, A., Lyashenko, Y., Melnik, A. and Goncharuk, A. (2010), Effective Models for the Specular Color Constituent Computing. *Journal of Computer Science and Engineering*. 2(2), pp. 25–29.
22. Romanyuk, A., Hast, A. and Lyashenko, Y. (2008), "Efficient Methods for Fast Shading", *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 8(2), pp. 82–85, available at: doi: 10.4316/aecce.2008.02015.
23. Principled BSDF. (2024), *Blender*. [Accessed on 02.10.2024], available at: [https://docs.blender.org/manual/uk/2.82/render/shader\\_nodes/shader/principled.html](https://docs.blender.org/manual/uk/2.82/render/shader_nodes/shader/principled.html).
24. Oren-Nayar in the Principled BSDF shader. (2024), *BlenderArtists*. [Accessed on 02.10.2024], available at: <https://blenderartists.org/t/oren-nayar-in-the-principled-bsdf-shader/1531766>.
25. Romanyuk, O.N., Abramchuk, I.V., Kyrylashchuk, S.A., and Romanyuk, S.O. (2019), "Specular color component modelling using energetically correct surface reflectance model", *Scientific notes of Taurida V. I. Vernadsky University. Series "Technical Sciences"*, No. 3, pp. 153–157, available at: doi: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-1/28>.
26. Giesen, F. (2024), "Phong Normalization Factor derivation", *Farbrausch*, available at: <https://www.farbrausch.de/~fg/stuff/phong.pdf>.
27. Gotanda, Y. (2010), "Phong Normalization Factor derivation Physically Based Shading Models in Film and Game Production: Practical Implementation at tri-Ace", *Citeseer*, available at: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=a3ab6be33c1dfb8536fabb3793cfda37401812>.
28. Romanyuk, O. and Zavalniuk, Y. (2024), "Deep Learning-Based Determination of Optimal Triangles Number of Graphic Objects Polygonal Model", *5th International Workshop on Intelligent Information Technologies and Systems of Information Security, March 28, 2024, Khmelnytskyi, Ukraine, CEUR*, available at: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/42383/151935.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.
29. Jiang, Y. (2016), "The Process of Creating Volumetric-based Materials in Uncharted 4", *Advances. RealTimeRendering*, available at: <https://advances.realtimerendering.com/s2016/>.
30. "Principled Hair BSDF BSDF". (2024), *Blender*, available at: [https://docs.blender.org/manual/en/dev/render/shader\\_nodes/shader/hair\\_principled.html](https://docs.blender.org/manual/en/dev/render/shader_nodes/shader/hair_principled.html).

Надійшла до редакції 07.10.2024

#### Y. K. ZAVALNIUK, O. N. ROMANYUK

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine  
qq9272627@gmail.com, rom8591@gmail.com

#### THE DEVELOPMENT OF METHOD FOR ADAPTIVE SELECTION OF SURFACE REFLECTANCE MODELS FOR RENDERING TASKS

In the article, it is proposed the method of adaptive selection of the reflectance model for the tasks of rendering three-dimensional scenes. The peculiarities of calculating the pixel color intensity during the scene object's surface shading are analyzed. The contribution of the diffuse and specular component to the final color intensity for various materials is considered. The main groups of surface reflectance models are discussed, each of which can be applied only to a certain type of surface. The simplest models of light reflection from diffuse and specular surfaces, more complex light reflectance models that take into account the microgeometry of the surface, and models designed for special types of surfaces are described. The main principles of the concept of adaptive selection of the light reflectance model and the typical stages of its implementation are analyzed. The need to develop new methods of adaptive selection of reflectance models is justified. The features of the proposed method for adaptive selection of light reflectance models are considered in detail. Within the scope of the method, an approach is proposed for choosing the optimal empirical reflectance model to ensure highly productive rendering of the scene. This approach is based on the analysis of the shininess coefficient of the surface. In addition, the recommendations are provided for the selection of light reflectance models for photorealistic visualization of surfaces of a general type, as well as surfaces of a special type, such as fabrics, hair, multilayer materials. At the same time, during highly realistic rendering, it is suggested to use a simple light reflectance model instead of a microfacet model if the surface roughness is small. This approach makes it possible to form a highly realistic image of the object of the scene without excessive computational costs. On the basis of conducting experiments using the BRDF Explorer software tool and using the NMSE metric, the level of surface roughness was determined, where the use of a simpler model is appropriate. The proposed method of adaptive selection of the reflectance model can be used to optimize the graphic systems of highly realistic and highly productive rendering.

**Keywords:** *bidirectional reflectance distribution function, adaptive selection, rendering, high productivity, photorealism*