

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

№ 1(40) ' 2025

Дрогобич – 2025

Публікується згідно з рішенням Вченої ради ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (протокол № 4 від 24.04.2025).

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); д-р техн. наук, проф. Я.Ю. Дорогий, (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. Зеленцова; канд. техн. наук, доц. Н.О. Маслова; канд. техн. наук, доц. І.А. Назарова (відп. секретар випуску).

Адреса редакції:

Юридична адреса: пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, Донецька область, 85300

Фактична адреса: вул. Самбірська, 76, м. Дрогобич, Львівська обл., 82111

Адреса для листування: вул. Шевченка, 9, м. Дрогобич, Львівська обл., 82100

E-mail: yevhen.bashkov@donntu.edu.ua

Збірник зареєстровано в Державному комітеті інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України. Свідоцтво: серія KB, №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	4
Розробка адаптивних паралельних процедур управління кроком моделювання з використанням сурогатного аналізу	
С.Д. Погорілий, П.В. Білецький	15
Розробка методів для пошуку кореферентних об'єктів в україномовних текстах на основі великих мовних моделей	
Лисов Б.С., Гуськова В.Г., Халигов А.А.	28
Застосування підходів інтелектуального аналізу даних для попереднього аналізу кіберзагроз на об'єктах критичної інфраструктури	
М.О. Александров	35
Modified Partial Data Method for Mutual Synchronization of Tree Parity Machines	
Є.О. Єжова	40
Мультимодальні системи нейромережевої аутентифікації користувачів на основі біометричних ознак	
В.О. Максименко, О.В. Фролов	51
Порівняльний аналіз продуктивності gRPC та RESTful API мікросервісів з використанням MongoDB та MS SQL Server	
В.І. Манжула, В.В. Файфура	60
Моделювання поширення концентрації мікропластику у атмосфері для об'єктів сфери поводження з ТПВ	
Є.К. Завальнюк, О. Н. Романюк, О. Я. Стахов, О.В. Романюк	70
Нова мікрофасетна модель відбиття світла на основі GGX-розподілу	
Я.А. Цапів, Р.Р. Тихий	80
Інноваційна вебсистема гоніометричного аналізу на базі нейронних мереж	
В.В. Кремньов	89
Результати комп'ютерного експерименту з архітектурної інтеграції апаратно-програмних компонент багаторівневої трансформації вимірюваних даних предикативного контролю вологості ґрунту	
М. В. Селіванов, А. В. Пархоменко	97
Дослідження методів та засобів проєктування інтелектуального інтерфейсу веборієнтованої комп'ютерної системи	
О.В. Самощенко	105
Формування порядку добутку чисел з рухомою комою при зміщеному кодуванні з додатним нулем	
Д.Ю. Пилипенко, О.О. Коваленко	111
Сучасні методи та інструменти тестування веборієнтованих систем	
С.В. Котлик, О.П. Соколова, О.Н. Романюк	119
Використання GPT-чат-бота в профорієнтаційній роботі університету	

УДК 004.92

Є. К. Завальнюк, аспірант,
О. Н. Романюк, д-р техн. наук, проф.,
О. Я. Стахов, к.т.н., старший викладач,
О.В. Романюк, к.т.н., доцент
Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна
qq9272627@gmail.com
rom8591@gmail.com
aleksey.stahov@gmail.com
romaniukoksnav@gmail.com

Нова мікрофасетна модель відбиття світла на основі GGX-розподілу

У статті запропоновано нову модель відбиття світла на основі GGX-розподілу. Розроблена модель забезпечує високореалістичне відтворення відблисків при спрощенні розрахунку коефіцієнтів Френеля та ослаблення світла. Проаналізовано основні типи двопромених функцій відбивної здатності, що застосовуються для формування відблисків. Зокрема, досліджено мікрофасетні двопроменеві функції Гаусса, Бекмана, Блінна, GGX для подання розподілу мікрофасет поверхні. Наведено переваги застосування GGX-розподілу. Розглянуто стандартні вирази для обчислення коефіцієнта Френеля та функції ослаблення світла. Показано, що існуючі вирази характеризуються високою обчислювальною складністю й не завжди відповідають вимогам систем рендерингу реального часу. Запропоновано нові кусково-задані поінтервальні поліноміальні вирази для пришвидшення розрахунку коефіцієнта Френеля. Розраховано виграш у продуктивності від застосування даних виразів шляхом обчислення сумарної кількості тактів процесора Intel Tremont. Показано, що нові вирази забезпечують більш точну апроксимацію еталонної функції порівняно з виразом Лагарда. Запропоновано два напрямки пришвидшення обчислення функції ослаблення світла. Перший напрямок передбачає вибір оптимального квадратичного полінома залежно від мінімального верхнього значення інтервалу, куди потрапляє вхідний кут-параметр. Другий напрямок передбачає застосування поінтервальних квадратичних поліномів, залежних від поточного значення вхідного параметра. Побудовано графіки відносних похибок значень отриманих виразів від значень оригінальної функції ослаблення світла. Показано, що забезпечується високоточна апроксимація еталонного виразу. На основі розрахунку сумарної кількості тактів процесора AMD Zen 4 обчислено виграш у продуктивності при застосуванні нової формули функції ослаблення світла. Додатково, запропоновано вираз спрощеного визначення параметра функції. Запропонована модель відбиття світла призначена для високореалістичного формування зображень у реальному часі.

Ключові слова: рендеринг, двопроменева функція відбивної здатності, коефіцієнт Френеля, коефіцієнт ослаблення світла

DOI: 10.31474/1996-1588-2025-1-40-70-79

Вступ

Фотореалістичність сформованих сцен є головним завданням високореалістичних систем тривимірного рендерингу. Для забезпечення високореалістичного формування зображень особливо важливим є фізично-точне подання особливостей відбиття світла від матеріалів. Для цього можуть враховуватись мікроскопічні нерівності поверхонь об'єктів, корпускулярно-хвильова природа світла, заломлення, ослаблення й поляризація світла.

Водночас, високореалістичні моделі відбиття світла потребують значні обчислювальні

ресурси. Вони розраховуються для визначення інтенсивності кольору [1] у кожній точці поверхні об'єкта. Це обмежує їхнє використання у графічних системах, що функціонують у реальному часі. Тому необхідною є розробка більш простих моделей відбиття світла, що забезпечують формування високореалістичних тривимірних сцен.

Аналіз літератури

Двопроменеві функції відбивної здатності [2-4] застосовуються для подання відбивних властивостей матеріалів і визначаються як відношення вихідної яскравості до вхідної

опроміненості [3]:

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

де L_r – вихідна енергетична яскравість, L_i – вхідна енергетична яскравість, $\vec{L}, \vec{V}$ – вектори падіння світла й відбиття до спостерігача відповідно, θ_i – кут між $\vec{L}$ і нормаллю $\vec{N}$, dw_i – диференціальний тілесний кут падіння світла.

На рис. 1 наведено основні дані [2] для обчислення ДФВЗ.

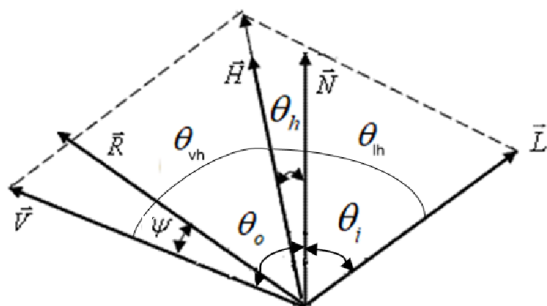


Рисунок 1 – Дані для обчислення ДФВЗ

$\vec{N}$ є нормаллю до точки поверхні, $\vec{L}, \vec{V}, \vec{R}$ ($\vec{R} = 2(\vec{L} \cdot \vec{N})\vec{N} - \vec{L}$), $\vec{H}$ ($\vec{H} = (\vec{L} + \vec{V})/|\vec{L} + \vec{V}|$) – відповідно вектори падіння світла, відбиття світла до спостерігача, дзеркального відбиття, серединний вектор, ψ , θ_h , θ_i , θ_o , θ_{ih} , θ_{vh} – відповідно кути між векторами $\vec{R}, \vec{V}, \vec{N}, \vec{H}, \vec{N}, \vec{L}, \vec{N}, \vec{V}, \vec{L}, \vec{H}, \vec{V}, \vec{H}$.

Найбільш простими є емпіричні ДФВЗ [2], що базуються на узагальненні відбивних властивостей матеріалів.

Основними емпіричними ДФВЗ є моделі Фонга та Блінна [5-6] що розраховуються за формулою:

$$\cos(x)^n,$$

де n – коефіцієнт спекулярності поверхні, x є кутом між $\vec{R}$ і $\vec{V}$ (ψ) у моделі відбиття Фонга, у моделі Блінна x є кутом між $\vec{N}$ і $\vec{H}$ (θ_h).

Емпіричні ДФВЗ використовуються у високопродуктивних системах тривимірного рендерингу й не забезпечують високореалістичне моделювання відбиття світла від поверхонь об'єктів. Фізично-точні ДФВЗ [7] призначені для використання у програмних системах фотореалістичного рендерингу. Висока реалістичність відтворення відбивних властивостей матеріалів досягається за рахунок подання поверхонь як сукупностей мікроскопічних дзеркальних ділянок (мікрофасет), врахування ослаблення світла внаслідок взаємного затінення й маскування між мікрофасетами, оцінювання залежності між кількістю відбитого світла та його кутом падіння.

Особливості розподілу мікрофасет

визначаються за допомогою функції D , що залежить від шорсткості матеріалу α . D визначає, яка частка мікрофасет відбиває світло у напрямку $\vec{H}$ між $\vec{L}$ і $\vec{V}$.

Одним із найпростіших варіантів D є розподіл Гаусса [8], що використовується у ДФВЗ Торренса-Сперроу (1967) і розраховується за формулою [8]:

$$D = ce^{-(\theta_h/\alpha)^2},$$

де c – довільна константа.

Іншою простою функцією розподілу є вираз на основі емпіричної ДФВЗ Блінна (1977) [9]:

$$D = \frac{\alpha+2}{2\pi} \cos(\theta_h)^\alpha.$$

Більш точною є функція розподілу Бекмана [3, 10], що обчислюється згідно з виразом

$$D = \frac{1}{\pi\alpha^2 \cos(\theta_h)^4} e^{-\left(\frac{\tan(\theta_h)}{\alpha}\right)^2} = \frac{1}{\pi\alpha^2 \cos(\theta_h)^4} e^{\frac{\cos(\theta_h)^2 - 1}{\alpha^2 \cos(\theta_h)^2}}.$$

Перевагою функції також є відсутність довільних констант для визначення. Розподіл використовується у моделі Кука-Торренса (1982). Спрощений вираз для розрахунку розподілу Бекмана має вид [11]:

$$D = \frac{1}{4\alpha^2} \left(\left(\frac{1}{8\alpha^2} - \frac{1}{4} \right) (\cos(\theta_h) - 1) + 1 \right)^{16}.$$

GGX-розподіл [3, 12] характеризується більш довгою зоною затухання, більш сконцентрованим епіцентром відблиску, більш точною апроксимацією вимірюваних характеристик матеріалів [9]. Окрім того, GGX-розподіл характеризується відносною простотою розрахунку. Використовується формула:

$$D = \frac{\alpha^2}{\pi \cos(\theta_h)^4 (\alpha^2 + \tan(\theta_h)^2)^2} = \frac{\alpha^2}{\pi ((\alpha^2 - 1) \cos(\theta_h)^2 + 1)^2}.$$

Даний розподіл було вперше введено у ДФВЗ Вальтера (2007) [12]. До цього, Д. Блінном було запропоновано використання ідентичного розподілу Тровбріджа-Рейтца (1977). GGX-розподіл використовується у якості головної спекулярної пелюстки ДФВЗ Disney (Бюрлі, 2012) [13]. Для оцінювання залежності між кількістю відбитого світла та кутом падіння використовується коефіцієнт Френеля F .

Для стандартного виразу обчислення F [2, 8] характерною є висока обчислювальна складність:

$$F = 0.5 \cdot \frac{(g-c)^2}{(g+c)^2} \left(1 + \left(\frac{c \cdot (g+c) - 1}{c \cdot (g-c) + 1} \right)^2 \right),$$

де $c = \cos(\theta_{vh})$, $g = \sqrt{c^2 + \tau^2 - 1}$, τ – коефіцієнт заломлення матеріалу.

К. Шліком (1994) запропоновано більш

простий вираз для обчислення F [14–16]:

$$F_0 + (1 - F_0)(1 - \cos(\theta_d))^5,$$

де F_0 – відбиття світла при нормальному падінні променя, θ_d – кут між $\vec{H}$ і $\vec{V}$ або між $\vec{H}$ і $\vec{L}$.

Недоліком виразу є необхідність піднесення складової до 5-го степеня. Тому надалі було запропоновано апроксимуючі вирази для обчислення.

Зокрема, С. Лагардом запропоновано апроксимативну формулу (F_{lgr}) [17] на основі двійкової експоненціальної функції:

$$F_0 + (1 - F_0) \cdot 2^{(-5.55473 \cdot \cos(\theta_d) - 6.98316) \cdot \cos(\theta_d)}.$$

Недоліком даного виразу є необхідність піднесення 2 до нецілого степеня.

Для оцінювання ефекту маскуванннн й затіненннн мікрофасет одна одною використовується коефіцієнт ослаблення світла G [2].

Стандартний вираз обчислення G [8] аналогічно є обчислювально складним і передбачає виконання операцій ділення.

$$G = \min\left(\frac{2 \cos(\theta_h) \cos(\theta_o)}{\cos(\theta_{vh})}, \frac{2 \cos(\theta_h) \cos(\theta_i)}{\cos(\theta_{lh})}, 1\right),$$

де $\theta_o, \theta_i, \theta_{vh}, \theta_{lh}$ – відповідно кути між $\vec{N}$ і $\vec{V}$, $\vec{N}$ і $\vec{L}$, $\vec{V}$ і $\vec{H}$, $\vec{L}$ і $\vec{H}$.

Окрім того, даний вираз характеризується розривами першої похідної та властивостями, що відсутні у реальних матеріалів [12]

Інший метод Сміта [18-20] полягає у знаходженні добутку окремих функцій затіненннн й маскуванннн світла G_1 (функції G_1 виводяться спеціально для відповідних розподілів):

$$G = G_1(\vec{L}, \vec{H}) G_1(\vec{V}, \vec{H}).$$

Для розподілу Бекмана G_1 наближено визначається [12]:

$$G_1(a) = \begin{cases} \frac{3.535a + 2.181a^2}{1 + 2.276a + 2.577a^2}, & a < 1.6, \\ 1, & a \geq 1.6 \end{cases},$$

де $a = (\alpha \tan(\theta_v))^{-1}$, де $\theta_v = \theta_o$ або θ_i .

Для GGX-розподілу G_1 обчислюється [12,21]:

$$\frac{2}{1 + \sqrt{\alpha^2 \tan^2(\theta_v) + 1}} = \frac{2}{1 + \sqrt{\frac{\alpha^2}{\tan^2(\theta_v) + 1}}}.$$

Недоліком виразу є наявність трудомістких операцій ділення та знаходження квадратного кореня.

Загалом, стандартний вираз для обчислення фізично-точних мікрофасетних ДФВЗ [3, 22-23] має вид:

$$\frac{DFG}{4 \cos(\theta_i) \cos(\theta_o)}.$$

Наявні вирази для обчислення компонент мікрофасетних ДФВЗ, зокрема для визначення

коефіцієнтів G і F , є складними й не завжди придатні для використання у системах рендерингу реального часу. Тому необхідною є розробка більш простих формул коефіцієнтів мікрофасетних моделей відбиття.

Спрощений вираз обчислення коефіцієнта Френеля

Здійснимо спрощення виразу Шліка для обчислення коефіцієнта Френеля. Для цього замінимо $\cos(\theta_d)$ у виразі $(1 - \cos(\theta_d))^5$ на t і розкладемо його у ряд Чебишова [24].

Розклад виразу у ряд Чебишова здійснюється згідно з виразом

$$f(x) \approx \left[\sum_{k=0}^{K-1} c_k T_k \left(\frac{x - 0.5(b+a)}{0.5(b-a)} \right) \right] - \frac{c_0}{2},$$

де $f(x)$ – оригінальна функція, $[a, b]$ – крайні значення аргумента $f(x)$, $c_j = \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K f \left[\cos \left(\frac{\pi(k-0.5)}{K} \right) \frac{(b-a)}{2} + \frac{(b+a)}{2} \right] \cos \left(\frac{\pi j(k-0.5)}{K} \right)$; $T_0(x) = 1$; $T_1(x) = x$; $T_n(x) = \cos(n \cdot \arccos(x))$, $K - 1$ – степінь полінома.

У результаті, запропоновано апроксимацію складової $(1 - t)^5$ (F_S) виразу Шліка квадратичними поліномами для 4 інтервалів значень t (F_{Snew}):

$$F_{Snew}(t) =$$

$$\begin{cases} (5.801 \cdot 10^{-3}t - 0.011)t + 5.348 \cdot 10^{-3}, & 1 \geq t \geq 0.85 \\ (0.381t - 0.594)t + 0.231, & t \geq 0.5 \wedge t < 0.85 \\ (2.478t - 2.667)t + 0.747, & t \geq 0.25 \wedge t < 0.5 \\ (6.75t - 4.708)t + 0.996, & t \geq 0.0 \wedge t < 0.25 \end{cases}$$

На рис. 2 наведено графіки значень складових F_S і F_{Snew} відносно $\theta_d \in [0; \pi/2]$.

Function value

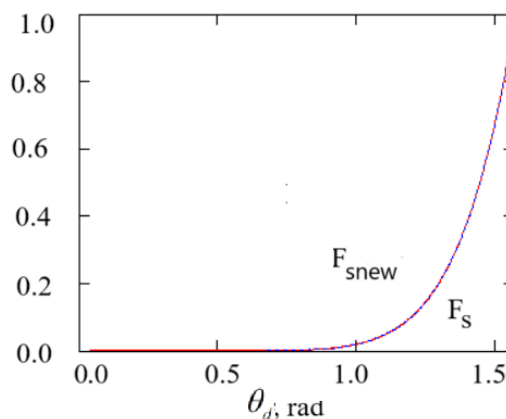
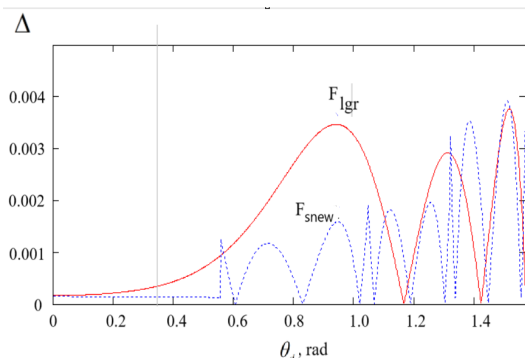


Рисунок 2 – Графіки F_S і F_{Snew}

На рис. 2 показано, що при застосуванні F_{Snew} забезпечується високоточна апроксимація F_S .

На рис. 3 наведено графіки абсолютних похибок запропонованого виразу F_{Snew} , апроксимативного виразу Лагарда (F_{lgr}) від F_S на проміжку $\theta_d \in [0; \pi/2]$.

Рисунок 3 – Графіки ΔF_{snew} , ΔF_{lgr} від F_s

Як показано на рис. 3, ΔF_{snew} від F_s на більшій частині проміжку $\theta_d \in [0; \pi/2]$ не перевищує 0.002 та є меншою, ніж ΔF_{lgr} від F_s . У таблиці 1 наведено кількості операцій процесора Intel Tremont [25] разом із відповідними кількостями тактів для розрахунку коефіцієнта Френеля на основі F_s . Наведено дані для випадків звичайного обчислення складової $((1 - \cos(\theta_d))^5)$ та оптимізованого обчислення:

$$(((1 - \cos(\theta_d))^2)^2 \cdot (1 - \cos(\theta_d))).$$

Таблиця 1 – Розрахунок сумарної кількості тактів Intel Tremont для обчислення коефіцієнта Френеля на основі F_s

Операція	Кількість операцій	Кількість тактів	Всього тактів
MUL	5	6	30
	4		24
	(оптимізовано)		(оптим.)
ADD	3	1	3
CMP	0	1	0
Всього			33
			27
			(оптим.)

У таблиці 2 наведено кількості операцій Intel Tremont разом із відповідними кількостями тактів для розрахунку коефіцієнта Френеля на основі F_{snew} . У даній таблиці та наступних число CMP наводиться при умові реалізації вибору інтервалу на основі бінарного пошуку.

Таблиця 2 – Розрахунок сумарної кількості тактів Intel Tremont для обчислення коефіцієнта Френеля на основі F_{snew}

Операція	Кількість операцій	Кількість тактів	Всього тактів
MUL	3	6	18
ADD	4	1	4
CMP	2	1	2
Всього			24

Отже, при використанні F_{snew} для Intel

Tremont вираш у продуктивності становить $33/24 = 1.38$ рази у звичайному випадку, у випадку оптимізації обчислення $F_s - 27/24 = 1.13$ рази. Загалом, запропонований вираз є високопродуктивним і забезпечує підвищення точності апроксимації F_s .

Спрощена функція ослаблення світла

Здійснимо спрощення функції $G1$ GGX-розподілу. Замінімо відношення $\frac{\alpha}{\text{ctg}(\theta_v)}$ на t .

$$\begin{aligned} \frac{2}{1 + \sqrt{\frac{\alpha^2}{\text{ctg}(\theta_v)^2} + 1}} &= \frac{2}{1 + \sqrt{\frac{\alpha^2 \sin^2(\theta_v)}{\cos^2(\theta_v)} + 1}} = \\ &= \frac{2}{1 + \sqrt{\frac{\alpha^2 (1 - \cos(\theta_v)^2)}{\cos^2(\theta_v)} + 1}} = \\ &= \frac{2}{1 + \sqrt{\left(\frac{\alpha \sqrt{1 - \cos(\theta_v)^2}}{\cos(\theta_v)}\right)^2 + 1}} = \\ &= \frac{2}{1 + \sqrt{t^2 + 1}} \end{aligned}$$

Визначимо можливі значення параметра t . α має діапазон значень $[0; 1]$, $\text{ctg}(\theta_v)$ відносно значень кутів θ_v $[0; \pi/2]$ має діапазон спадних значень $[\infty; 0]$. Тоді діапазон можливих значень t становить $[0; \infty]$. Оскільки для можливості обчислення апроксимаційного виразу діапазон значень t повинен бути скінченним, обмежимо діапазон значень θ_v до $[0; 1.48]$ ($1.48 \approx 85^\circ$). Відповідно, спадний діапазон значень $\text{ctg}(\theta_v)$ становить $[\infty; 0.087]$. У результаті, діапазон можливих значень t становить $[0; 11.494]$. Запропоновано два способи спрощеного розрахунку $G1$ на основі використання рядів Чебишова. Перший спосіб полягає у виборі апроксимаційного виразу залежно від мінімального верхнього значення інтервалу, куди потрапляє кут θ_v (таблиця 3).

Таблиця 3 – Рекомендовані апроксимаційні вирази для обчислення $G1$ залежно від кута θ_v

№	Діапазон значень θ_v	Діапазон значень t	Вираз обчислення $G1$
1	$[0; 30^\circ]$	$t \geq 0 \wedge t \leq 0.57$	$(-0.193t - 0.015)t + 1$
2	$[0; 45^\circ]$	$t \geq 0 \wedge t \leq 1$	$(-0.12t - 0.058)t + 1.003$
3	$[0; 60^\circ]$	$t \geq 0 \wedge t \leq 1.733$	$(-0.032t - 0.15)t + 1.014$
4	$[0; 75^\circ]$	$t \geq 0 \wedge t \leq 3.731$	$(0.026t - 0.267)t + 1.05$
5	$[0; 85^\circ]$	$t \geq 0 \wedge t \leq 11.494$	$(9.461 \cdot 10^{-3}t - 0.18)t + 1.018$

Позначимо наведені вирази як $G1_n$, де n – номер виразу у таблиці 3. Другий спосіб передбачає у використанні кусково-заданої поліноміальної функції:

$$G1(t) = \begin{cases} (0.026t - 0.267)t + 1.05, & t \geq 0 \\ (3.256 \cdot 10^{-3}t - 0.08)t + 0.65, & 4 \leq t \leq 11.494 \end{cases}$$

Позначимо даний вираз як $G1_{comb}$. На рис. 4 наведено графіки еталонної $G1$, $G1_1 - G1_5$, $G1_{comb}$.

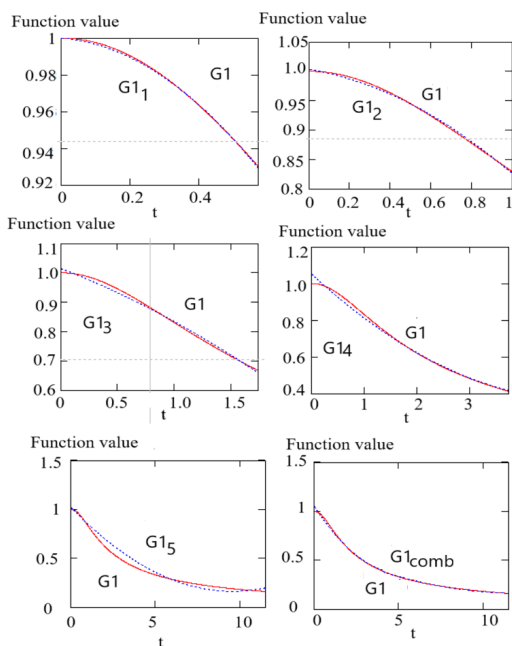


Рисунок 4 – Графіки еталонної $G1$, $G1_1 - G1_5$, $G1_{comb}$

На рис. 5 наведено графіки відносних похибок $\delta G1_1 - G1_5$, $G1_{comb}$ від $G1$ відносно значення t . Максимальні відносні похибки $G1_1$, $G1_2$, $G1_3$, $G1_4$, $G1_5$, $G1_{comb}$ від $G1$ становлять відповідно 0.1, 0.4, 1.5, 5, 23, 5%.

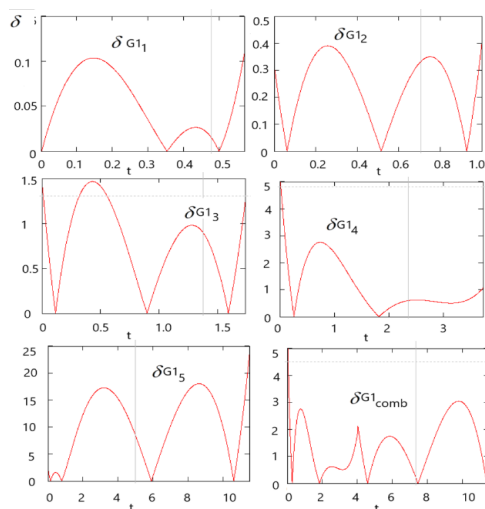


Рисунок 5 – Графік відносних похибок між $G1_1 - G1_5$, $G1_{comb}$ і $G1$

На рис. 6 наведено тривимірні графіки відносних похибок $\delta G1_1 - G1_5$, $G1_{comb}$ від $G1$ відносно значень $\alpha \in [0,1]$, $\theta_v \in [0; 1.48]$.

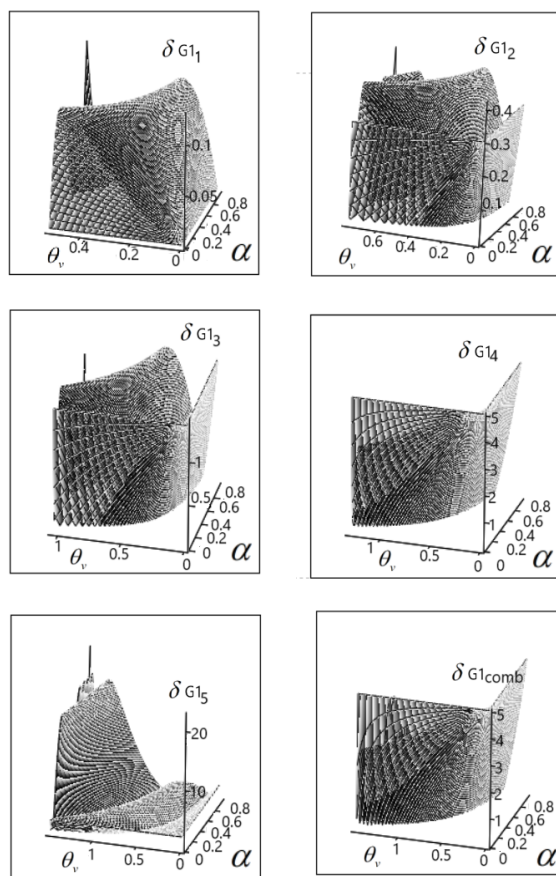


Рисунок 6 – Тривимірні графіки відносних похибок між $G1_1 - G1_5$, $G1_{comb}$ і $G1$

Додатково, здійснимо спрощення виразу розрахунку t , розклавши оригінальний вираз у ряд Чебишова. У результаті, запропоновано апроксимацію виразу обчислення t за допомогою кусково-заданого виразу:

$$t = \frac{\alpha \sqrt{(1 - \cos(\theta_v))^2}}{\cos(\theta_v)} \approx$$

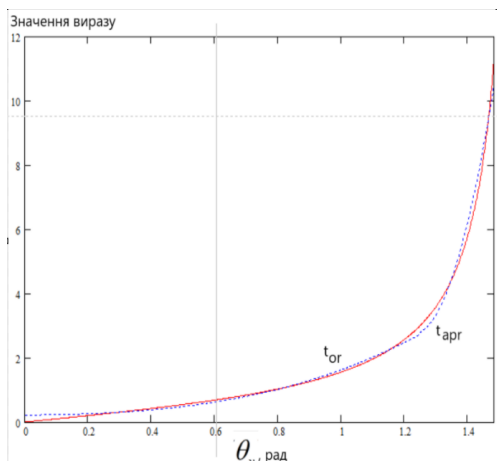
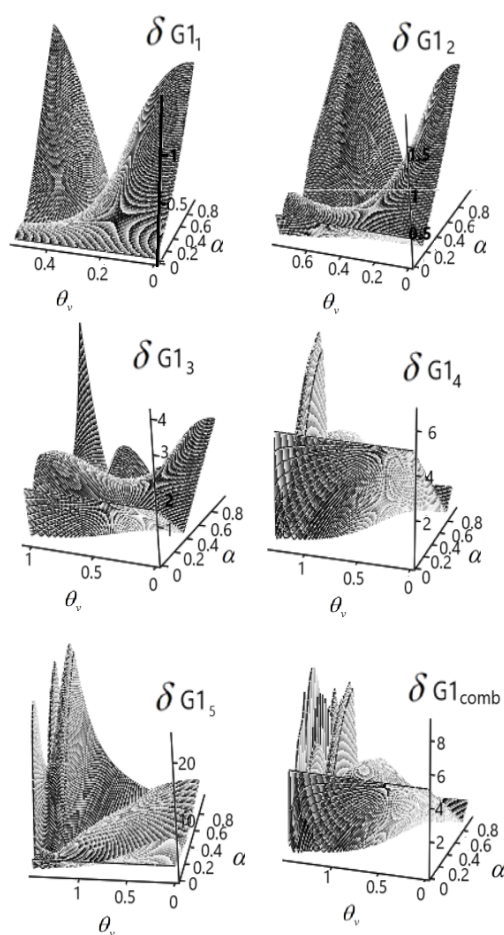
$$\begin{cases} \alpha(C(2.692 \cdot C - 7.208) + 4.736), & C \geq 0.32 \\ \alpha(C(122.885 \cdot C - 83.306) + 16.849), & C < 0.32 \end{cases}$$

де $C = \cos(\theta_v)$.

На рисунку 7 наведено графіки значень оригінального та спрощеного виразів обчислення t (t_{or} і t_{appr}) відносно значень θ_v при $\alpha = 1$.

На рис. 8 наведено тривимірні графіки відносних похибок $\delta G1_1 - G1_5$, $G1_{comb}$ від $G1$ відносно значень $\alpha \in [0,1]$, $\theta_v \in [0; 1.48]$ при застосуванні t_{appr} замість t_{or} .

У такому випадку, максимальні відносні похибки $G1_1$, $G1_2$, $G1_3$, $G1_4$, $G1_5$, $G1_{comb}$ від $G1$ становлять 1.5, 2, 4, 7, 25, 9 % відповідно.

Рисунок 7 – Графіки t_{or} і t_{apr} відносно значень θ_v при $\alpha = 1$ Рисунок 8 – Тривимірні графіки відносних похибок між $G1_1 - G1_5$, $G1_{comb}$ і $G1$ при використанні t_{apr}

Обчислимо виграш у продуктивності при обчисленні $G1_1$, $G1_2$, $G1_3$, $G1_4$, $G1_5$, $G1_{comb}$ замість $G1$.

У таблиці 4 наведено кількості операцій AMD Zen 4 [25] разом із відповідними кількостями

тактів для розрахунку еталонної функції $G1$.

Таблиця 4 – Розрахунок сумарної кількості тактів AMD Zen 4 для обчислення $G1$

Операція	Кількість операцій	Кількість тактів	Всього тактів
MUL	3	3	9
ADD	3	1	3
DIV	2	10	20
Всього			32

У таблиці 5 зазначено кількості операцій AMD Zen 4 разом із відповідними кількостями тактів для розрахунку:

$$G1_1/G1_2/G1_3/G1_4/G1_5/G1_{comb}.$$

Враховано операції для обчислення t . Число CMP включає перевірку, чи $\theta_v > 1.48(85^\circ)$.

Таблиця 5 – Розрахунок сумарної кількості тактів AMD Zen 4 для обчислення $G1_n$, $G1_{comb}$

Операція	Кількість операцій	Кількість тактів	Всього тактів
MUL	4	3	12
ADD	3	1	3
DIV	1	10	10
CMP	3 ($G1_n$) 2 ($G1_{comb}$)	1	3 ($G1_n$) 2 ($G1_{comb}$)
Всього			28 ($G1_n$) 27 ($G1_{comb}$)

У таблиці 6 зазначено кількості операцій AMD Zen 4 разом із відповідними кількостями тактів для розрахунку:

$$G1_1/G1_2/G1_3/G1_4/G1_5/G1_{comb}$$

при спрощеному обчисленні t . Аналогічно, число CMP передбачає перевірку $\theta_v > 1.48$.

Таблиця 6 – Розрахунок сумарної кількості тактів AMD Zen 4 для обчислення $G1_n$, $G1_{comb}$ при спрощеному обчисленні t

Операція	Кількість операцій	Кількість тактів	Всього тактів
MUL	5	3	15
ADD	4	1	4
DIV	0	10	0
CMP	4 ($G1_n$) 3 ($G1_{comb}$)	1	4 ($G1_n$) 3 ($G1_{comb}$)
Всього			23 ($G1_n$) 22 ($G1_{comb}$)

Отже, обчислення $G1_n$, $G1_{comb}$ забезпечують виграш у продуктивності у $32/28 = 1.14$, $32/27 = 1.19$ разів відповідно порівняно з обчисленням $G1$. При спрощеному обчисленні t виграш у продуктивності становить $32/23 = 1.39$, $32/22 = 1.45$ разів відповідно.

Висновки

У статті запропоновано нову модель відбиття світла, що базується на використанні GGX-розподілу мікрофасет, а також високопродуктивних виразів обчислення коефіцієнта Френеля та коефіцієнта ослаблення світла.

Нові вирази розрахунку коефіцієнта Френеля забезпечують удвічі більшу точність апроксимації еталонного виразу Шліка порівняно із виразом Лагарда. Продуктивність обчислення коефіцієнта процесором Intel Tremont підвищено на 13-38% порівняно з еталонним виразом Шліка.

Залежно від значення вхідного параметра, нові вирази розрахунку коефіцієнта ослаблення світла характеризуються відносною похибкою апроксимації еталонного виразу до 1.5%-9%. Порівняно з оригінальним виразом, продуктивність обчислення коефіцієнта ослаблення світла процесором AMD Zen 4 підвищено до 45%.

Розроблена модель відбиття світла призначена для використання у високореалістичних системах тривимірного рендерингу, що функціонують у режимі реального часу.

Література

1. Романюк О. Н. Комп'ютерна графіка / О. Н. Романюк, О. В. Романюк, Р. Ю. Чехмestрук. 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. 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/604e0290a6fdcccf7d9a9c/Crash-Course-in-BRDF-Implementation.pdf (date of access: 21.03.2025).
4. Zhou Y. An overview of BRDF models in computer graphics / Y. Zhou // Theoretical and Natural Science. 2023. Vol. 19, no. 1. P. 205–210. URL: <https://doi.org/10.54254/2753-8818/19/20230550> (date of access: 21.03.2025).
5. New surface reflectance model with the combination of two cubic functions usage / O. Romanyuk, Y. Zavalniuk, S. Pavlov, R. Chekhmestruk, Z. Bondarenko, T. Koval, A. Kalizhanova, A. Iskakova // 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: 21.03.2025).
6. Simulation research on the reflection characteristics of typical microsurfaces for remote sensing targets / X. Yu, et al. // International Conference on Remote Sensing Technology and Survey Mapping (RSTSM 2024), Changchun, China, 12–14 January 2024 / eds. by H. Sohrabi, T. K. Lohani. 2024. URL: <https://doi.org/10.1117/12.3029399> (date of access: 21.03.2025).
7. BxDF material acquisition, representation, and rendering for VR and design / G. C. Guarnera, et al. // SA '19: SIGGRAPH Asia 2019, Brisbane, Queensland, Australia, 2019. URL: <https://doi.org/10.1145/3355047.3362092> (date of access: 21.03.2025).
8. Cook R. L. A Reflectance Model for Computer Graphics / R. L. Cook, K. E. Torrance // ACM Transactions on Graphics. 1982. Vol. 1, no. 1. P. 7–24. URL: <https://doi.org/10.1145/357290.357293> (date of access: 21.03.2025).
9. Akenine-Möller T. Real-Time Rendering. Fourth edition / T. Akenine-Möller, et al. Boca Raton: A K Peters / CRC Press, 2018. URL: <https://doi.org/10.1201/b22086> (date of access: 21.03.2025).
10. Sawicki D. Microfacet Distribution Function: To Change or Not to Change, That Is the Question / D. Sawicki // Proceedings of the 16th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications - Volume 1: VISIGRAPP, Setúbal, Portugal, 8–10 February 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.5220/0010252702090220> (date of access: 21.03.2025).
11. Nechyporuk M. Method and Model for a Highly Realistic Rendering of a Three-Dimensional Image / M. Nechyporuk, O. Romanyuk // Central European Researchers Journal. 2020. Vol. 6, Issue 1. P. 128–141.
12. Microfacet Models for Refraction through Rough Surfaces / B. Walter, et al. // Eurographics Symposium on Rendering (2007), Grenoble, France, 25 June 2007. URL: <https://www.graphics.cornell.edu/~bjw/microfacetbsdf.pdf> (date of access: 21.03.2025).
13. Burley B. Physically-based shading at Disney / B. Burley // CourseWare Wiki. URL: https://cw.fel.cvut.cz/b241/_media/courses/b4m39rso/lectures/s2012_pbs_disney_brdf_notes_v3.pdf (date of access: 21.03.2025).
14. Majercik Z. The Schlick Fresnel Approximation / Z. Majercik // Ray Tracing Gems II. Berkeley, CA, 2021. P. 109–114. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4842-7185-8_9 (date of access: 21.03.2025).
15. Hoffman N. Generalization of Adobe's Fresnel Model / N. Hoffman // RenderWonk. URL: <https://renderwonk.com/publications/wp-generalization-adobe/gen-adobe.pdf> (date of access: 21.03.2025).

16. Kaltheuner J. Capturing Anisotropic SVBRDFs / J. Kaltheuner, L. Bode, R. Klein // Vision, Modeling, and Visualization (2021), Dresden, Germany, 27–28 September 2021. URL: https://cg.cs.uni-bonn.de/backend/v1/files/publications/kaltheuner_2021a.pdf (date of access: 21.03.2025).
17. Lagarde S. Spherical Gaussian approximation for Blinn-Phong, Phong and Fresnel / S. Lagarde // SebLagarde.WordPress. URL: <https://seblagarde.wordpress.com/2012/06/03/spherical-gaussian-approximation-for-blinn-phong-phong-and-fresnel/> (date of access: 21.03.2025).
18. Panahi B. Estimating Spectral BRDF Parameters Using Handheld Devices / B. Panahi, A. Sole, I. Farup // Color and Imaging Conference, Montreal, Canada, 28 October – 1 November 2024. 2024. URL: https://ivarfa.folk.ntnu.no/publications/conference/Panahi_24_cic.pdf (date of access: 21.03.2025).
19. Mikkelsen A. F. A novel method for approximating local changes in the surface absorption for laser marking using 3D laser scanning / A. F. Mikkelsen, A. N. Thomsen, M. A. Kristiansen // 18th Nordic Laser Materials Processing Conference (18th NOLAMP), Luleå, Sweden, 18–20 January 2022. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1135/1/012002> (date of access: 21.03.2025).
20. Bidirectional reflectance distribution function of recrystallized tungsten mono-block exposed to cyclic heat loading / H. Natsume, et al. // Nuclear Materials and Energy. 2022. Vol. 33. P. 101243. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nme.2022.101243> (date of access: 21.03.2025).
21. Dimov R. Deriving the Smith shadowing function G1 for $\gamma \in (0, 4]$ / R. Dimov // Static.Chaos. URL: https://static.chaos.com/documents/assets/000/000/369/original/gtr_shadowing.pdf?1676451994 (date of access: 21.03.2025).
22. Rhee C.-H. Estimating Physically-Based Reflectance Parameters From a Single Image With GAN-Guided CNN / C.-H. Rhee, C. H. Lee // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 13259–13269. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3147483> (date of access: 21.03.2025).
23. Fresnel Microfacet BRDF: Unification of Polari-Radiometric Surface-Body Reflection / T. Ichikawa, et al. // 2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Vancouver, BC, Canada, 17–24 June 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/cvpr52729.2023.01582> (date of access: 21.03.2025).
24. Accelerated Vector Normalization for Rendering Tasks / O. Romanyuk, Y. Zavalniuk, P. Mykhaylov, R. Chekhmestruk, N. Titova, S. Romanyuk // 2024 14th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Ceske Budejovice, Czech Republic, 19–21 September 2024. 2024. URL: <https://doi.org/10.1109/acit62333.2024.10712602> (date of access: 21.03.2025).
25. Fog A. Instruction tables / A. Fog // Agner. URL: https://www.agner.org/optimize/instruction_tables.pdf (date of access: 21.03.2025).

References

1. Romanyuk, O. N., Romanyuk, O. V. and Chekhmestruk, R. Y. (2023), *Computer Graphics [Kompiuterna hrafika]*, Vinnytsia: VNTU. 147p.
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. 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.
4. Zhou, Y. (2023), "An overview of BRDF models in computer graphics", *Theoretical and Natural Science*, 19(1), pp. 205–210, available at: doi: 10.54254/2753-8818/19/20230550.
5. Romanyuk, O., Zavalniuk, Y., Pavlov, S., Chekhmestruk, R., Bondarenko, B., Koval, T., Kalizhanova, A. and 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.
6. Yu, X., Wu, T., Yi, J. and Tan, Y. (2024), "Simulation research on the reflection characteristics of typical microsurfaces for remote sensing targets", *International conference on remote sensing technology and survey mapping (RSTSM 2024)*, January 12–14, 2024, Changchun, China, SPIE, available at: doi: 10.1117/12.3029399
7. Guarniera, G. C., Guarniera, D., Ward, G. J., Glencross, M. and Hall, I. (2019), "BxDF material acquisition, representation, and rendering for VR and design", *SA '19: SIGGRAPH Asia 2019, Brisbane, Queensland, Australia*, ACM, available at: doi: 10.1145/3355047.3362092
8. Cook, R. L. and Torrance, K. E. (1982), "A reflectance model for computer graphics", *ACM Transactions on Graphics*, 1(1), pp. 7–24, available at: doi: 10.1145/357290.357293.
9. Akenine-Möller, T. (2018), *Real-Time rendering. Fourth edition*, Boca Raton : A K Peters / CRC Press, available at: doi: 10.1201/b22086.
10. Sawicki, D. (2021), "Microfacet distribution function: to change or not to change, that is the question", *16th international conference on computer graphics theory and applications, February 8–10, 2021, Setúbal*,

- Portugal, SCITEPRESS - Science and Technology Publications, available at: doi: 10.5220/0010252702090220
11. Nechyporuk, M. and Romanyuk, O. (2020), "Method and Model for a Highly Realistic Rendering of a Three-Dimensional Image", *Central European Researchers Journal*, 6(1), pp. 128–141.
 12. Walter, B., Marschner, S. R., Li, H. and Torrance, K. E. (2007), "Microfacet models for refraction through rough surfaces", *Eurographics symposium on rendering (2007), June 25, 2007, Grenoble, France*.
 13. Burley, B. (2012), "Physically-based shading at Disney", *CourseWare Wiki*, available at: https://cw.fel.cvut.cz/b241/_media/courses/b4m39rso/lectures/s2012_pbs_disney_brdf_notes_v3.pdf.
 14. Majercik, Z. (2021), "The Schlick Fresnel approximation", *Ray tracing gems II*, Berkeley, CA: Apress., pp. 109–114, available at: doi: 10.1007/978-1-4842-7185-8_9.
 15. Hoffman, N. (2023), "Generalization of Adobe's Fresnel model", *RenderWonk*, available at: <https://renderwonk.com/publications/wp-generalization-adobe/gen-adobe.pdf>
 16. Kaltheuner, J., Bode, L. and Klein, R. (2021), "Capturing Anisotropic SVBRDFs", *Vision, modeling, and visualization (2021), September 27–28, 2021, Dresden, Germany*.
 17. Lagarde, S. (2012), "Spherical Gaussian approximation for Blinn-Phong, Phong and Fresnel", *Seblagarde.WordPress*, available at: <https://seblagarde.wordpress.com/2012/06/03/spherical-gaussian-approximation-for-blinn-phong-phong-and-fresnel/>.
 18. Panahi, B., Sole, A. and Farup, I. (2024), "Estimating spectral BRDF parameters using handheld devices", *Color and imaging conference, October 28–November 1, 2024, Montreal, Canada*.
 19. Mikkelsen, A. F., Thomsen, A. N. and Kristiansen, M. (2022), "A novel method for approximating local changes in the surface absorption for laser marking using 3D laser scanning", *18th Nordic laser materials processing conference (18th NOLAMP), January 18–20, 2022, Luleå, Sweden*.
 20. Natsume, H., Nojiri, K., Kajita, S., Fukuda, M., Ushiki, T., Tanaka, H., Sugie, T., Kitazawa, S.-i., Kikuchi, T., Yokozuka, T., Ohno, N., Ezato, K. and Hatae, T. (2022), "Bidirectional reflectance distribution function of recrystallized tungsten mono-block exposed to cyclic heat loading", *Nuclear Materials and Energy*, 33, 101243, available at: doi: 10.1016/j.nme.2022.101243
 21. Dimov, R. (2015), "Deriving the Smith shadowing function G_1 for $\gamma \in (0, 4]$ ", *Static.Chaos*, available at: https://static.chaos.com/documents/assets/000/000/369/original/gtr_shadowing.pdf?1676451994.
 22. Rhee, C.-H. and Lee, C. H. (2022), "Estimating physically-based reflectance parameters from a single image with GAN-guided CNN", *IEEE Access*, 10, pp. 13259–13269, available at: doi: 10.1109/access.2022.3147483
 23. Ichikawa, T., Fukao, Y., Nobuhara, S. and Nishino, K. (2023), "Fresnel Microfacet BRDF: Unification of Polari-Radiometric Surface-Body Reflection", *2023 IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition (CVPR), June 17–24, 2023, Vancouver, BC, Canada*, IEEE, available at: doi: 10.1109/cvpr52729.2023.01582
 24. Romanyuk, O., Zavalniuk, Y., Mykhaylov, P., Chekhmestruk, R., Titova, N. and Romanyuk, S. (2024), "Accelerated vector normalization for rendering tasks", *2024 14th international conference on advanced computer information technologies (ACIT), September 19–21, 2024, Ceske Budejovice, Czech Republic*, IEEE, available at: doi: 10.1109/acit62333.2024.10712602.
 25. Fog, A. (2022), "Instruction tables", *Agner*, available at: https://www.agner.org/optimize/instruction_tables.pdf.

Надійшла до редакції 4.04.2025

Y. K. ZAVALNIUK, O. N. ROMANYUK

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine

qq9272627@gmail.com, rom8591@gmail.com

NEW MICROFACET LIGHT REFLECTANCE MODEL BASED ON THE GGX DISTRIBUTION

In the article, it is proposed a new light reflectance model which is based on the GGX distribution. The developed model provides a highly realistic glare reproduction while simplifying the calculation of Fresnel and shadowing-masking coefficients. The main types of bidirectional reflectance distribution functions, which are used for glares formation, are analyzed.

In particular, the microfacet bidirectional reflectance distribution functions and their components are considered. The key features of Gauss, Beckmann, Blinn, GGX functions usage for representing the microfacet distribution are described. The advantages of using the GGX distribution are listed. The standard expressions for Fresnel and shadowing-masking coefficient calculation are listed. It is shown that the existing expressions are characterized with a high computational complexity and not always correspond to the requirements of real-time rendering systems. The new piecewise polynomials for speeding up the Fresnel coefficient calculation are proposed. The performance gain from applying these expressions was obtained by calculating the total number of clock counts of the Intel Tremont processor.

It is shown that proposed expressions provide a more accurate approximation of the reference function in comparison with the Lagarde expression. It is proposed the two approaches for speeding up the masking-

shadowing coefficient calculation. The first approach involves choosing the optimal quadratic polynomial depending on the minimum upper value of the interval where the input angle parameter falls. The second approach involves the usage of the piecewise quadratic polynomials, which depend on the current parameter value.

The plots of relative errors of obtained expression values from the original shadowing-masking function values are built. It is shown that the highly accurate approximation of the reference expression is provided. Based on the calculation of total clock counts of AMD Zen 4 processor, the productivity gain from applying the new shadowing-masking function formula is calculated. Additionally, the expression of simplified determination of function parameter is proposed. The proposed model is intended for use in real-time highly-realistic image formation systems.

Keywords: *rendering, bidirectional reflectance distribution function, Fresnel coefficient, shadowing-masking function*