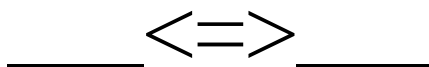


# УКРАЇНА ТА СВІТ: СУЧАСНІ ПАРАДИГМИ РОЗВИТКУ СУСПІЛЬСТВА



Колективна монографія



Харків  
СГ НТМ «Новий курс»  
2024

УДК 001:1  
У45

**Україна та світ: сучасні парадигми розвитку суспільства:** кол. моногр. – Харків: СГ НТМ «Новий курс», 2024. – 148 с.

**ISBN 978-617-7886-52-4**

**DOI: 10.61718/mon**



Рецензенти

***Штулер Ірина Юріївна**, доктор економічних наук, професор,  
перший проректор ВНЗ «Національна академія управління»*

***Погоріла Світлана Григорівна**, кандидат педагогічних наук,  
доцент кафедри славістичної філології, педагогіки і методики викладання  
Білоцерківського національного аграрного університету*

***Гетьман Ірина Анатоліївна**, кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри комп'ютерних інформаційних технологій  
Донбаської державної машинобудівної академії*

***Харченко Артем Вікторович**, кандидат історичних наук, доцент,  
доцент кафедри мистецької освіти та гуманітарних дисциплін  
Харківського національного університету мистецтв імені І. П. Котляревського*

Рекомендовано до друку редакційною колегією  
Соціально-гуманітарної науково-творчої майстерні «Новий курс»  
(протокол № 19-мн від 27.07.2024)



Видавець СГ НТМ «Новий курс» – діяльність у науковій, видавничій,  
освітній, творчій, інформаційній сфері з 1989 року.  
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру  
видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції:  
ДК № 8013 від 22.11.2023. Зареєстровано у Global Register of Publishers.  
Ідентифікатор видавця 7886. [www.newroute.org.ua/cnt](http://www.newroute.org.ua/cnt)



Колективна монографія присвячена актуальним питанням розвитку сучасного суспільства. Досліджуються проблеми в таких сферах як: освіта, фізична культура, спорт, культура і мистецтво, дизайн, релігієзнавство, історія, філософія, культурологія, журналістика, філологія, богослов'я, економіка, політологія, психологія, соціологія, міжнародні відносини, суспільні комунікації, соціальна робота, соціальне забезпечення, оподаткування, фінанси, банківська справа, страхування, менеджмент, маркетинг, підприємництво, торгівля, біржова діяльність, легка промисловість, видавництво, поліграфія, готельно-ресторанна справа, екологія, туризм. Монографія буде корисною науковцям, викладачам, здобувачам освіти, а також широкому колу осіб, які цікавляться питаннями розвитку сучасної науки та практики.

**ISBN 978-617-7886-52-4**

**DOI: 10/61718/mon**

Опубліковано на основі ліцензії Creative Commons Attribution License.

© СГ НТМ «Новий курс», 2024

© Автори, 2024

Зміст

	Стор.
Передмова	4
Розділ перший.	
Освіта, дизайн, комп'ютерна графіка.	5
1.1. Впровадження сучасних технологій в підготовку майбутніх юристів у закладах вищої освіти	5
1.2. It tools for teachers – the new norm of educational process: advantages and application scenarios	8
1.3. Методичні підходи до організації та проведення навчальної практики з геоморфології студентів-географів	12
1.4. Аналіз нових моделей освітлення на основі двопроменевих функцій відбивної здатності	16
1.5. Підготовка вихователя у контексті використання ідей родинної педагогіки	40
Розділ другий.	
Політологія, історія, право, кібербезпека.	51
2.1. Політичний аспект боротьби з кібертероризмом в Україні	51
2.2. Особливості правового регулювання суспільних відносин в Україні в умовах воєнного стану	53
2.3. Hetmanate of Pylyp Orlyk: the struggle for Ukrainian statehood	57
Розділ третій.	
Економіка, міжнародні відносини, облік.	72
3.1. Implementation of regulatory mechanisms in the creation of a barrier-free environment on an economic basis for the rehabilitation of servicemen of the Armed Forces of Ukraine	72
3.2. Розроблення та обґрунтування екологічного концепту формування організаційно-економічного механізму забезпечення енергоефективності аграрної сфери	75
3.3. Основні види та структурні елементи експортного потенціалу українських підприємств	87
3.4. Аграрний сектор економіки України у воєнний час: аналіз ключових тенденцій та парадигма розвитку	89
3.5. Організація обліку та формування облікового забезпечення операцій із запасами	113
3.6. Аналіз інноваційно-інвестиційного стану та розвитку економіки України: проблеми та повоєнні перспективи	129
Післямова	147

## Передмова

Колективна монографія присвячена актуальним питанням розвитку сучасного суспільства. У колективній монографії буде досліджено сучасні проблеми в таких сферах як: освіта, фізична культура, спорт, культура і мистецтво, дизайн, релігієзнавство, історія, філософія, культурологія, журналістика, філологія, богослов'я, економіка, політологія, психологія, соціологія, міжнародні відносини, суспільні комунікації, соціальна робота, соціальне забезпечення, регіональні студії, облік, оподаткування, фінанси, банківська справа, страхування, менеджмент, маркетинг, підприємництво, торгівля, біржова діяльність, легка промисловість, видавництво, поліграфія, готельно-ресторанна справа, екологія, туризм.

Монографія буде корисною науковцям, викладачам, здобувачам освіти, а також широкому колу осіб, які цікавляться питаннями розвитку сучасної науки та практики.

До авторського колективу монографії залучені наступні науковці (інформацію подано мовою оригіналу рукописів авторів): Bilenka Olha, Kushnir Oleksandr Oleksandrovych, Talavuyria Mykola, Vdovenko Nataliia, Бобко Олексій Леонідович, Гапотій Віктор Дмитрович, Гурін Олександр Григорович, Завальнюк Євген Костянтинівич, Зінченко Олександра Ігорівна, Калічак Юрій Львович, Калугін Владислав Ігорович, Лисенко Алла Миколаївна, Непша Олександр Вікторович, Овандер Наталія Львівна, Прилипко Вікторія Михайлівна, Пугаченко Ольга Борисівна, Романюк Олександр Никифорович.

Авторами монографії досліджено актуальні питання сучасної науки та опубліковано наступні рукописи (інформацію подано мовою оригіналу рукописів авторів): Впровадження сучасних технологій в підготовку майбутніх юристів у закладах вищої освіти; It tools for teachers – the new norm of educational process: advantages and application scenarios; Методичні підходи до організації та проведення навчальної практики з геоморфології студентів-географів; Аналіз нових моделей освітлення на основі двопробних функцій відбивної здатності; Підготовка вихователя у контексті використання ідей родинної педагогіки; Політичний аспект боротьби з кібертероризмом в Україні; Особливості правового регулювання суспільних відносин в Україні в умовах воєнного стану; Hetmanate of Pylyp Orlyk: the struggle for Ukrainian statehood; Implementation of regulatory mechanisms in the creation of a barrier-free environment on an economic basis for the rehabilitation of servicemen of the Armed Forces of Ukraine; Розроблення та обґрунтування екологічного концепту формування організаційно-економічного механізму забезпечення енергоефективності аграрної сфери; Основні види та структурні елементи експортного потенціалу українських підприємств; Аграрний сектор економіки України у воєнний час: аналіз ключових тенденцій та парадигма розвитку; Організація обліку та формування облікового забезпечення операцій із запасами; Аналіз інноваційно-інвестиційного стану та розвитку економіки України: проблеми та повоєнні перспективи.

Інформаційною базою дослідження стали нормативно-правові документи, звіти профільних установ, методичні та статистичні матеріали суб'єктів господарювання, матеріали експертних досліджень, аналітичні огляди, опитування, анкетування, наукові та методичні публікації тощо.

5. Профіль освітньої програми «Середня освіта. Географія. Фізична культура» спеціальності 014. 07 Середня освіта (Географія) / Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана Хмельницького. URL: <https://mdpu.org.ua/wp-content/uploads/2021/02/Serednya-osvita.-Geografiya.-Fizichna-kultura.pdf> (дата звернення: 12.07.2024)
6. Прохорова Л. А., Гришко С. В., Непша О. В. Екологічний зміст навчальної практики з геології та геоморфології географів-бакалаврів. Географія та туризм: Матеріали IV Всеукраїнської науковопрактичної Інтернет-конференції Харківського національного педагогічного університету ім. Г.С. Сковороди (26 лютого 2021 р., м. Харків) / за заг. ред. Лоцмана П. І. Харків: ХНПУ ім.Г.С.Сковороди, 2021. С. 25-31.
7. Прохорова Л. А. Основні положення проведення навчальної практики з геоморфології зі студентами-географами. II Шкловські читання «проблеми сучасних природничо-математичних наук та методик їх викладання; з. тез II Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (15-29 жовтня 2020 року). Глухів, 2020. С. 127.
8. Прохорова Л. А., Гришко С. В. Методичні підходи до організації та проведення навчальної практики з геоморфології. Науковий вісник Чернівецького університету : збірник наукових праць. Чернівці: Чернівецький нац. ун-т, 2015. Вип. 744-745: Географія. С. 43-46.
9. Ткачук Н. М., Барський Ю. М. Практичні аспекти підготовки майбутніх вчителів географії, економіки до професійної діяльності в НУШ. Академічні студії. Серія «Педагогіка». Вип. 3. 2022. С. 64-71.

**Романюк Олександр Никифорович**

Доктор технічних наук, професор

ORCID: 0000-0002-2245-3364

Вінницький національний технічний університет

**Завальнюк Євген Костянтинович**

ORCID: 0009-0005-1202-4653

Вінницький національний технічний університет

**Бобко Олексій Леонідович**

ORCID: 0009-0000-1753-279X

Вінницький національний технічний університет

**1.4. Аналіз нових моделей освітлення на основі двопробієвих функцій відбивної здатності**

У роботі проаналізовано особливості нових моделей освітлення на основі двопробієвих функцій відбивної здатності. Ключові слова: ДФВЗ, модель Блінна-Фонга, модель Кука-Торренса, модель Disney.

**Вступ.** У тривимірній графіці [1] одним із найважливіших завдань є створення максимально реалістичних зображень. Для досягнення високого рівня візуального реалізму необхідно точно моделювати геометрію та матеріали об'єктів, що відбивають світло. Серед різноманітних аспектів, які впливають на реалістичність зображення, ключове значення мають особливості відбиття світла від поверхонь. При цьому, моделювання відбивних властивостей матеріалів є трудомістким завданням. Традиційні моделі можуть не відповідати вимогам інтерактивних систем рендерингу. Це може суттєво знижувати продуктивність [2] системи під час формування графічних сцен. Тому актуальною задачею є розробка нових моделей відбиттясвітла для зменшення обчислювальної складності та забезпечення високої реалістичності відтворення відблисків.

Мета роботи – проаналізувати особливості нових моделей освітлення на основі двопробієвих функцій відбивної здатності поверхні.

**Аналіз літератури.** ДФВЗ [3] (BRDF – bidirectional reflectance distribution function) є математичною функцією, що визначає, яка частка світла відбивається від поверхні з напрямку падіння світла у напрямку до спостерігача. ДФВЗ можуть варіюватись залежно від властивостей різних матеріалів, що забезпечує високоточне моделювання відбиття світла від різних поверхонь.

При розрахунку ДФВЗ використовується формула [3, 4]

$$\frac{dI(\vec{V})}{I(\vec{L}) \cos \theta_i dw}$$

де  $I(\vec{V})$  – інтенсивність випромінювання, відбитого у напрямку до спостерігача,  $I(\vec{L})$  – інтенсивність випромінювання у напрямку падіння світла,  $\theta_i$  – кут між вектором падіння світла і нормаллю,  $dw$  – диференціальний тілесний кут на поверхні одиничної сфери.

На рис. 1 наведено основні дані, що використовуються при обчисленні ДФВЗ.  $\vec{L}$  є напрямком до джерела світла,  $\vec{N}$  – нормаль до поверхні,  $\theta_o$  – кут між вектором до спостерігача і нормаллю,  $\varphi_i, \varphi_o$  – кут між координатною віссю і спроєктованим вектором  $\vec{L}, \vec{V}$  відповідно,  $ds$  – елемент площі ділянки, на яку падає світло.

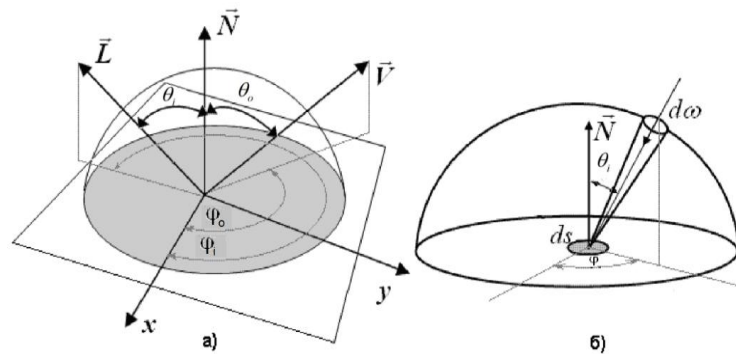


Рис. 1. Дані для обчислення ДФВЗ [3]

Для забезпечення високої реалістичності зображення ДФВЗ повинні бути фізично-коректними. Це включає дотримання трьох умов [3]: значення ДФВЗ повинне бути позитивним, повинен виконуватись принцип симетричності Гельмгольца (можливість взаємозаміни векторів-параметрів ДФВЗ) та відповідність закону збереження енергії (кількість відбитої від поверхні енергії  $\epsilon$  не більшою, ніж кількість енергії, отриманої поверхнею при освітленні).

Серед ДФВЗ аналітичного типу (рис. 2) можна виділити феноменологічні ДФВЗ [5] і теоретичні (фізично-точні) ДФВЗ [3-7].

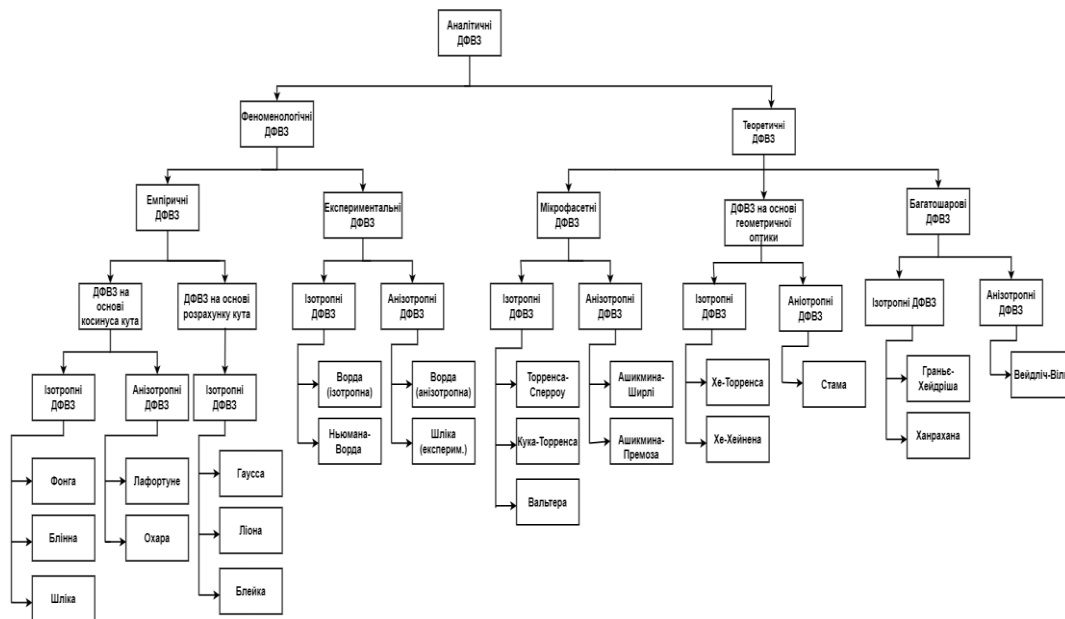


Рис. 2. Класифікація аналітичних ДФВЗ

Феноменологічні ДФВЗ розробляються на основі узагальнення даних і спостережень про відбивні здатності матеріалів. Вони поділяються на емпіричні ДФВЗ [3-7] і експериментальні ДФВЗ [6-7].

Емпіричні ДФВЗ [3-7] полягають у розробці математичних апроксимаційних виразів для матеріалів певного класу. Моделі є простими, ефективними та широко поширеними. Проте, емпіричні ДФВЗ не є фізично-коректними. Відповідно, емпіричні моделі відбиття використовуються у системах рендерингу, де формування зображення у режимі реального часу є більш важливим, ніж високий рівень реалістичності зображення.

Серед емпіричних моделей виділяються ДФВЗ на основі косинуса кута [3, 6, 7] та ДФВЗ на основі розрахунку кута [3]. Моделі на основі косинуса кута характеризуються високою продуктивністю, оскільки косинус обчислюється шляхом розрахунку скалярного добутку векторів. До них належать ДФВЗ Фонга [3-6, 8-9], Блінна-Фонга [3-6], Шліка [3, 6], Лафортуне [5, 6], Охара [3].

ДФВЗ Фонга(1975) [3–6, 8-9] завдяки простоті та можливості ефективного відтворення відблисків є однією з найбільш поширених моделей відбиття. Обчислення моделі включає розрахунок косинуса кута між вектором до спостерігача  $\vec{V}$  та вектором дзеркального відбиття  $\vec{R} = 2(\vec{L} \cdot \vec{N})\vec{N} - \vec{L}$  (рис. 3) і використання коефіцієнта спекулярності поверхні  $n$ . ДФВЗ Фонга обчислюється за формулою

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

де  $\cos(\psi) = (\vec{R} \cdot \vec{V})$ .

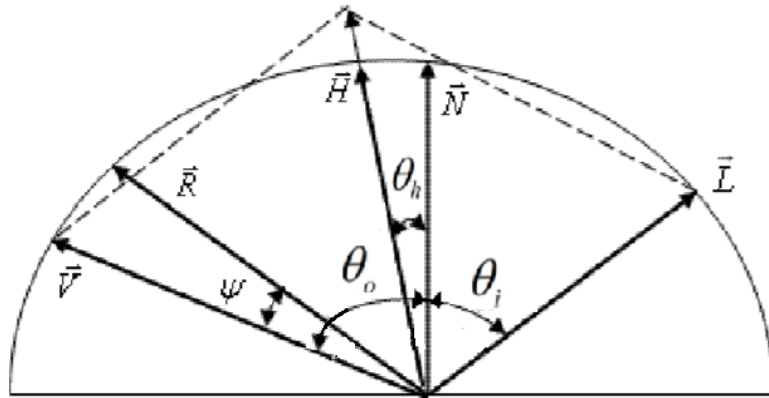


Рис. 3. Вектори для розрахунку моделі Фонга

ДФВЗ Блінна-Фонга(1977) [3-6] є удосконаленням ДФВЗ Фонга. Використовується напіввектор  $\vec{H} = \vec{L} + \vec{V} / |\vec{L} + \vec{V}|$  між векторами до спостерігача та освітлення, що забезпечує покращення візуальних характеристик спекулярних відблисків. ДФВЗ Блінна-Фонга обчислюється як

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

де  $\cos(\theta_h) = (\vec{N} \cdot \vec{H})$ .

При значних значеннях  $n$  обчислення ДФВЗ Блінна-Фонга стає трудомістким.

ДФВЗ Шліка(1994) [3, 6] є апроксимацією моделі Блінна-Фонга, у якій усувається піднесення  $\cos(\theta_h)$  до степеня. Вираз обчислюється за формулою

$$\frac{\cos(\theta_h)}{n - n \cos(\theta_h) + \cos(\theta_h)}$$

На рис. 4 (а) наведено графіки ДФВЗ Блінна-Фонга ( $f_b$ ) та Шліка ( $f_s$ ) при  $n = 50$ , на рис. 4 (б) наведено графік максимальних відносних похибок ДФВЗ Шліка від оригінальної функції відносно  $n \in [1, 100]$ . Як показано на рисунку, ДФВЗ Шліка не забезпечує реалістичне відтворення зони блюмінгу відблиску.

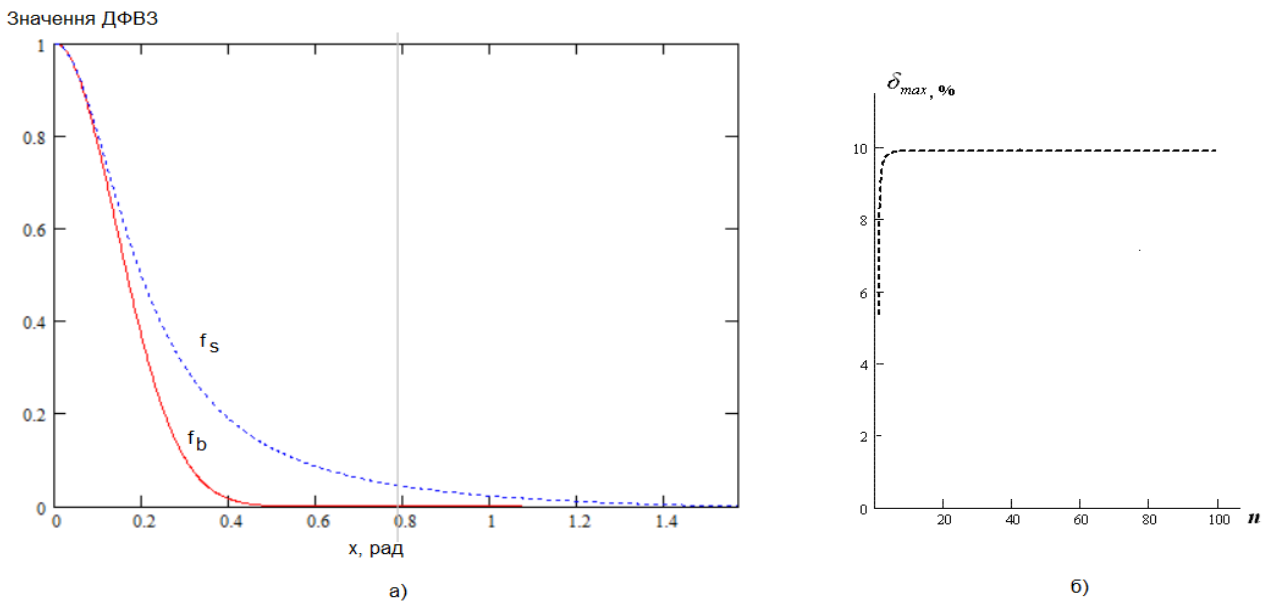


Рис. 4. Графіки  $f_s, f_b$  при  $n = 50$  (а) і значення максимальних відносних похибок  $f_s$  від  $f_b$  залежно від  $n$  (б)

ДФВЗ Лафортуне (1997)[5, 6] є узагальненням косинусної моделі Фонга. Модель враховує  $N$  спекулярних пелюсток і параметри для управління спекулярним відбиттям, ретрорефлексією, анізотропією.

ДФВЗ Фонга, Блінна-Фонга, Шліка є ізотропними [3] (відбиття світла не залежить від повороту навколо  $\vec{N}$ ). Оскільки у ДФВЗ Лафортуне забезпечується можливість моделювання анізотропного відбиття світла за допомогою підбору параметрів, ДФВЗ можна віднести до анізотропних моделей [3]. Іншою анізотропною моделлю є ДФВЗ Охара (1981) [3], що дозволяє за допомогою 4 параметрів моделювати відблиски у формі еліпса.

ДФВЗ на основі розрахунку кута між векторами характеризуються додатковими обчислювальними витратами на обчислення значення кута, проте дозволяють управляти формою відблиска. До ДФВЗ даного типу належать моделі Гаусса [3], Ліона [3], Блейка [3]. Наприклад, ДФВЗ Гаусса[3] дозволяє високоточно відтворити відблиск на поверхні об'єкта, однак включає розрахунок арккосинуса. Використовується формула

$$e^{-\frac{n(\angle(\vec{N}, \vec{L}))^2}{2}}$$

ДФВЗ Ліона обчислюється за формулою

$$\left(1 - \frac{x}{2^k}\right)^{2^k}$$

де  $k$  - підбраний коефіцієнт,  $x = (n/2)a^2$  (кут  $a$  може бути апроксимований як довжина різницевого вектора між  $\vec{L}, \vec{R}$ ).

На рис. 5. наведено графіки ДФВЗ Гаусса ( $f_g$ ) і ДФВЗ Ліона ( $f_L$ ) при  $k = 2, n = 50$ . ДФВЗ Ліона характеризується необхідністю обнулення зростаючих значень.



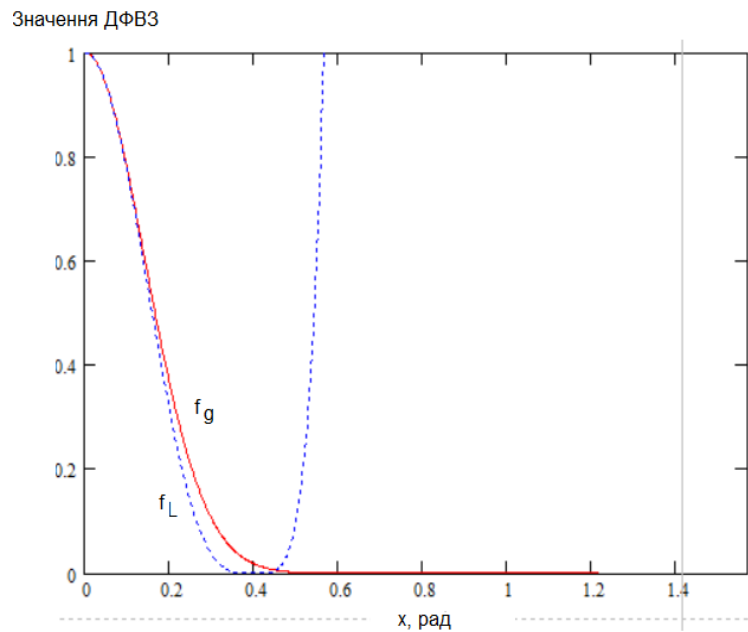


Рис. 5. Графіки  $f_g$  і  $f_L$  при  $n = 50$

Експериментальні ДФВЗ [6-7] полягають у формульній апроксимації великих наборів вимірних даних. На відміну від емпіричних моделей, вони більше базуються на експериментальних даних, ніж на узагальненні практичних спостережень. Найбільш відомими експериментальними моделями є ДФВЗ Ворда (ізотропна та анізотропна версії) [3-6,8], Шліка [6], Ньюмана-Ворда [5].

Анізотропна модель Ворда (1992) [3-6, 8, 10] призначена для подання відбиття світла, характерного для матеріалів, таких як шовк і сатин. Вважається, що поверхня є сукупністю мікроскопічних ділянок. Просторові параметри шорсткості  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$  визначають відхилення розподілу ділянок від ідеально гладкої поверхні. Формула обчислення анізотропної ДФВЗ Ворда визначається як

$$\frac{1}{\sqrt{\cos \theta_i \cos \theta_o}} \frac{\exp\left(-\tan^2 \theta_h \left(\frac{\cos^2 \varphi_h}{\alpha_x^2} + \frac{\sin^2 \varphi_h}{\alpha_y^2}\right)\right)}{4\pi \alpha_x \alpha_y},$$

де  $\varphi_h$  – азимутальний кут напіввектора.

Додатково, автором моделі запропоновано конструкцію гоніорефлектометра для здобуття емпіричних даних відбивних властивостей матеріалів.

На рис. 6. зображено візуалізовані фігури «Чайник» у програмному засобі BRDFExplorer на основі феноменологічних ДФВЗ Фонга, Блінна-Фонга, Шліка та Ворда.



спекулярних відблисків в індустріях рендерингу та відеоігор. Розподіл відомий своєю здатністю забезпечувати створення реалістичних широких відблисків. Даний розподіл еквівалентний розподілу Тровбріджа-Рейтца. Застосовується формула [8]

$$D(\theta_h) = \frac{\alpha^2 \chi^+(\theta_h)}{\pi \cos^4 \theta_h (\alpha^2 + \tan^2 \theta_h)^2},$$

де  $\chi^+$  – функція Хевісайда (1, якщо аргумент більше 0, інакше 0).  
Розподіл було введено у ДФВЗ Вальтера (2007) [5].

На рис. 7 наведено графіки функцій розподілу мікрофасет Бекмана ( $d_b$ ) і GGX ( $d_{ggx}$ ) відносно  $\theta_h \in [0; \pi/2]$  при  $\alpha = 0.5$ .

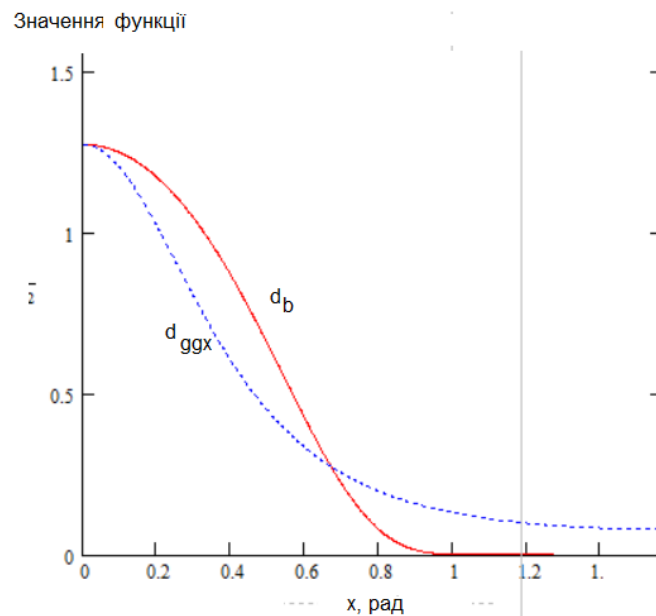


Рис. 7. Графіки  $d_b$  і GGX  $d_{ggx}$  при  $\alpha = 0.5$

Коефіцієнт Френеля [3] визначає кількість відбитого світла при визначеному куті падіння світла. Для обчислення  $F$  поширеним є використання апроксимації Шліка (1994) [3]

$$F_0 + (1 - F_0)(1 - \cos \theta_o)^5$$

де  $F_0$  – відбивна здатність при нормальному падінні світла.

Функція ослаблення світла  $G$  [3] подає маскування і блокування освітлення мікроповерхнею об'єкта. Для розрахунку  $G$  поширеним є використання функції Сміта  $G2$  [8]

$$G2 = G1(\vec{H}, \vec{L})G1(\vec{H}, \vec{V}).$$

Перша складова формули відповідає за затінення, друга - за маскування світла.

ДФВЗ на основі геометричної оптики [3, 6-7] характеризуються особливо великою обчислювальною

складністю. Враховується хвильова природа світла та явища, такі як інтерференція, дифракція. До моделей даного типу належать ДФВЗ Хе-Торренса [3-6], Хе-Хейнена [6], Стама [12].

Модель Хе-Торренса (1991) [3-6] поєднує складові одноманітного дифузного відбиття, направленого дифузного відбиття та спекулярного відбиття. При розрахунку моделі враховуються складні параметри та функції, такі як функція затінення, функція ефективної шорсткості поверхні, коефіцієнт Френеля, довжина хвилі світла, вектор поляризації вхідного освітлення.

Багат шарові ДФВЗ [6-7] використовуються для подання відбивних властивостей багат шарових матеріалів, таких як фарба. Поширеними є моделі Граньє-Хейдріша [6], Ханрахана [8], Вейдліч-Вілкі [5]. Наприклад, модель Граньє-Хейдріша (2003) [6] призначена для подання багат шарових поверхонь, покритих тонким верхнім шаром. ДФВЗ включає складові відбиття та пропускання світла.

На рис. 8. зображено візуалізовані фігури «Чайник» у програмному засобі BRDFExplorer на основі теоретичних ДФВЗ Кука-Торренса, Ашикмина-Ширлі та Вальтера.



Рис. 8. Візуалізовані фігури «Чайник» на основі теоретичних ДФВЗ

Окрім аналітичних ДФВЗ, можуть виділятися моделі на основі вимірювань [4-6]. Моделі на основі вимірювань полягають у використанні таблиць вимірів реальних значень відбивної здатності поверхні.

Для здобуття даних використовуються високоточні спеціалізовані приклади, як гоніофотометри та гоніорефлектометри. У результаті вимірів отримуються великі обсяги даних, що включають інтенсивності відбиття світла при різних кутах освітлення матеріалів. Прикладом є база даних ДФВЗ MERL, сформована Матусіком та ін. (2003) [5-6]. Найбільш простим підходом до використання отриманих даних є пряме застосування таблиць при зафарбовуванні поверхні об'єкта. Однак, такий підхід передбачає значні обчислювальні витрати. Тому для подання табличних даних використовуються [6] базисні функції, сферичні гармоніки, зважені суми функцій, факторизація функцій, поліноми Зерніке, сферичні вейвлети. Наприклад, Лоуренсом та ін. (2004) [5-6] застосовано подання ДФВЗ як добутку функцій меншої розмірності для зберігання даних у більш компактній табличній формі. Модель освітлення Лебедева (2009)[13, 14] полягає у компактному збереженні даних про відбивні властивості матеріалів за допомогою набору декількох утворюючих функцій. Утворююча функція подає значення ДФВЗ відносно кута між вектором дзеркального відбиття і вектором до спостерігача при фіксованому векторі освітлення. Як правило, використовуються дані ДФВЗ на основі 5-6 фотографій. При зафарбовуванні поверхні для напряму освітлення визначаються два найбільш схожі напрями з набору й використовується лінійна інтерполяція для визначення значення ДФВЗ.

Моделі даного типу використовуються для задач кіноіндустрії, ігор, архітектури, промислового дизайну, де важливою є висока якість графічних зображень. Недоліками моделей є необхідність здійснення трудомістких вимірювань та обробки великих даних.

Існуючі ДФВЗ характеризуються типовими недоліками. Феноменологічні ДФВЗ, як правило, не є фізично-коректними і не забезпечують високореалістичне відтворення відблисків. Теоретичні ДФВЗ, попри значну обчислювальну складність, не є універсальними. Тому здійснюється розробка нових ДФВЗ.

**Нові феноменологічні моделі відбиття.** ДФВЗ Готанда (2010) [15] є фізично-коректною моделлю відбиття світла на основі ДФВЗ Блінна-Фонга. Модель передбачає розрахунок нормалізаційного коефіцієнта для забезпечення енергетичної коректності та коефіцієнта Френеля (апроксимації Шліка). ДФВЗ обчислюється за формулою

$$\frac{\rho_d}{\pi}(1 - F_0) + coef(n) \cdot \frac{F(F_0, \vec{V}, \vec{H})(\cos \theta_h)^n}{\max(\cos \theta_i, \cos \theta_o)}$$

де  $\rho_d$  – коефіцієнт дифузного відбиття поверхні,  $coef(n)$  – нормалізаційний коефіцієнт  $(0.0397436n + 0.0856832)$

ДФВЗ Гейслера-Мородера-Дюра (2010) [5, 16] є вдосконаленою експериментальною ДФВЗ Ворда, де забезпечується дотримання закону збереження енергії для усіх кутів. Це досягається за рахунок введення спеціальної нормалізаційної формули  $fnorm$  та модифікації знаменника виразу. ДФВЗ розраховується згідно з формулою

$$\frac{\rho_d}{\pi} + \frac{\rho_s}{\pi \alpha_x \alpha_y} \cdot \exp[-\tan^2 \theta_h (\frac{\cos^2 \varphi_h}{\alpha_x^2} + \frac{\sin^2 \varphi_h}{\alpha_y^2})] \cdot fnorm(\theta_i, \theta_o, \varphi_i, \varphi_o)$$

де  $\rho_s$  - коефіцієнт спекулярного відбиття поверхні,

$$fnorm(\theta_i, \theta_o, \varphi_i, \varphi_o) = \frac{2[1 + \cos \theta_i \cos \theta_o + \sin \theta_i \cos \theta_o \cos(\varphi_o - \varphi_i)]}{(\cos \theta_i + \cos \theta_o)^4}$$

С. Лагарде розроблено апроксимаційні вирази (2012) [17] ДФВЗ Блінна-Фонгарізного рівня точності, оснований на експоненціальній функції

$$e^{-n(1-\cos \theta_h)} ;$$

$$e^{(n+0.775)(\cos \theta_h - 1)}$$

Авторами огляду було запропоновано ряд високопродуктивних моделей для апроксимації ДФВЗ Блінна-Фонга.

Енергетично-коректна модифікація ДФВЗ Шліка (2022) [18, 19] порівняно з оригінальною функцією забезпечує підвищення реалістичності відтворення зони затухання відблиску. Модель розраховується за формулою

$$coef(n) \cdot \frac{2 \cos \psi}{1.25(n - n \cos \psi + 1.25 \cos \psi)^2}$$

$$coef(n) = 0.125n - \frac{45.76}{n + 46.578} + 1.317$$

Енергетично-коректна логарифмічна ДФВЗ (2023) [20] забезпечує достатньо точну апроксимацію моделі Блінна-Фонга та має зручну форму для апаратної реалізації. Використовується формула

$$coef(n) \cdot (1 - 0.5 \log_2(1 - n \cdot \log_2(\cos(\psi))))$$

де  $coef(n) = (0.197(n + 1.24) + 0.068 / (0.64 + n))$

Косинус-степеневі ДФВЗ [21] дозволяє апроксимувати еталонну функцію виразом низького степеня  $a$ . Значення  $a$  зазвичай становить  $\{2, 4, 8, 16\}$  і підбирається залежно від необхідного рівня реалістичності та продуктивності формування зображення. Функція обчислюється за виразом

$$((n/a)(\cos \theta_h - 1) + 1)^a$$

Зокрема, енергетично-коректна косинус-степеневі ДФВЗ 16 степеня [22] має вид

$$((1.027n + 4.8) / 8\pi)((n/16)(\cos \theta_h - 1) + 1)^{16}$$

На рис. 9 зображено графіки модифікованої ДФВЗ Шліка ( $f_{ms}$ ), логарифмічної ДФВЗ ( $f_{log}$ ), косинус-степеневі ДФВЗ 16 степеня ( $f_{16}$ ) (без нормалізаційного коефіцієнта) при  $n = 50$ .

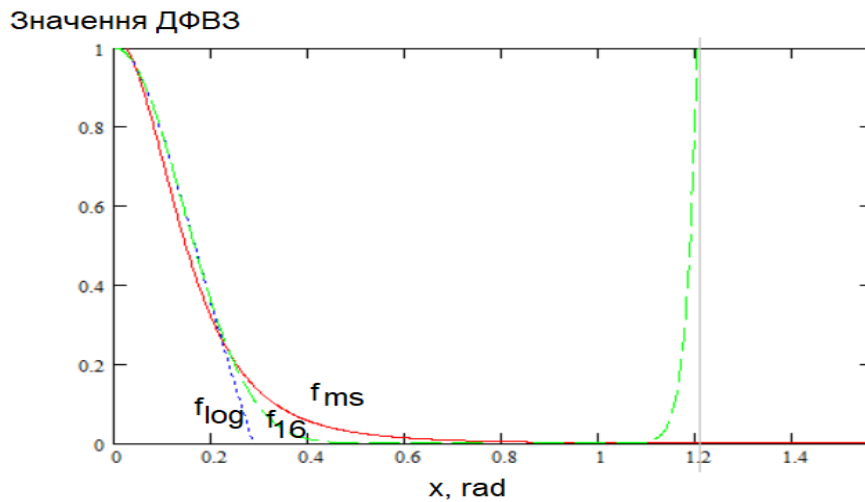


Рис. 9.  $f_{ms}$ ,  $f_{log}$ ,  $f_{16}$  при  $n = 50$

Оскільки косинус-степеневі функції більших степенів співпадають із косинус-степеневими функціями менших степенів у зоні епіцентру відблиска, доцільним є їх комбіноване використання.

Наприклад, запропонована комбінована ДФВЗ (2023) [23] полягає у поєднанні косинус степеневих функцій четвертого і шістнадцятого степенів ( $f_4$  і  $f_{16}$  відповідно) у точці  $connect(n)$

$$\begin{cases} f_4, \theta_h \leq connect(n) \\ f_{16}, connect(n) < \theta_h \leq lim(n) \\ 0, \theta_h > lim(n) \end{cases}$$

де  $lim(n) \approx \frac{6}{\sqrt{n}} \cdot lim(n)$  застосовується, оскільки  $f_{16}$  зростає після досягнення нульового рівня.  $connect(n)$  залежно від значення коефіцієнта спекулярності поверхні обчислюється

$$connect(n) = \begin{cases} -0.0039n^3 + 0.0663n^2 - 0.3934n + 1.16, & n \in [1, 8] \\ -5.526 \cdot 10^{-3}n + 0.305, & n \in (8, 30] \\ -5.567 \cdot 10^{-4}n + 0.144, & n \in (30, 150] \\ -3.591 \cdot 10^{-5}n + 0.059, & n \in (150, 1000] \end{cases}$$

Значення  $connect(n)$  призначені для зберігання у пам'яті системи.

Для апроксимації ДФВЗ Блінна-Фонга також можливим є використання квадратичної функції  $0.786n \cos^2 \theta_h + (1 - 0.786n) \cos \theta_h$  [24]. Даний вираз не забезпечує достатньо реалістичне відтворення зони затухання відблиску.

Тому іншим запропонованим комбінованим підходом (2023)[25] є поєднання квадратичної функції у зоні епіцентру відблиска та підібраної кубічної функції у зоні затухання. Комбінована ДФВЗ розраховується згідно із виразами

$$\begin{cases} 0.786n \cos^2 \theta_h + (1 - 0.786n) \cos \theta_h, & \theta_h \leq connect(n) \\ A \cos^3 \theta_h + B \cos^2 \theta_h + C \cos \theta_h, & \theta_h > connect(n) \end{cases}$$

Коефіцієнти  $A, B, C$  кубічної моделі обчислюються

$$\begin{cases} A = 0.2 \frac{LR(3R - 3L) + GR(5E^2 - R5E) + LQ(L5E - 5E^2)}{L^3(RE^2 - R^2E) + L^2(R^3E - RE^3) - LR^2(RE^2 - E^3)} \\ B = 0.2 \frac{GR(R^25E - 5E^3) + LR(3L^2 - 3R^2) + QL(5E^3 - L^25E)}{L^3(RE^2 - R^2E) + L^2(R^3E - RE^3) - LR^2(RE^2 - E^3)} \\ C = 0.2 \frac{GR(R5E^3 - R^25E^2) + L^2Q(L5E^2 - 5E^3) + LR(3LR^2 - 3L^2R)}{L^3(RE^2 - R^2E) + L^2(R^3E - RE^3) - LR^2(RE^2 - E^3)} \end{cases}$$

де  $Q = \cos^n(t) = 0.125$ ,  $G = \cos^n(u) = 1/32$ ,  $E = e^{-0.511/n}$ ,  $R = \cos(t)$ ,  $L = \cos(u)$ .  
Передбачається збереження коефіцієнтів кубічної функції у пам'яті.

Точка  $connect(n)$  спрощено розраховується

$$\begin{cases} (1/2^{12} + 1/2^{18})n^2 - (1/2^6)n + (1/2^1 - 1/2^4 - 1/2^6 - 1/2^7 - 1/2^9), & n < 32 \\ (1/2^{16} - 1/2^{20} - 1/2^{21})n^2 - (1/2^7 - 1/2^8 - 1/2^{10} + 1/2^{15})n + (1/2^2 + 1/2^7 + 1/2^{10}), & n \geq 32 \wedge n < 100 \\ (1/2^{20})n^2 - (1/2^{11} + 1/2^{14} + 1/2^{15})n + (1/2^3 + 1/2^6 + 1/2^7), & n \geq 100 \end{cases}$$

Застосування кубічної функції [26] замість квадратичної  $A_1 \cos^3 \theta_h + B_1 \cos^2 \theta_h + C_1 \cos \theta_h$  забезпечує більш точну апроксимацію еталонного виразу. Коефіцієнти даної функції розраховуються за виразами

$$\begin{cases} A_1 = \frac{LR(R-L) + GR(1-R) + LQ(L-1)}{L^3(R-R^2) + L^2(R^3-R) - LR^2(R-1)} \\ B_1 = \frac{GR(R^2-1) + LR(L^2-R^2) + QL(1-L^2)}{L^3(R-R^2) + L^2(R^3-R) - LR^2(R-1)} \\ C_1 = \frac{GR(R-R^2) + L^2Q(L-1) + LR(LR^2-L^2R)}{L^3(R-R^2) + L^2(R^3-R) - LR^2(R-1)} \end{cases}$$

де  $Q = \cos^n(t) = 0.5$ ,  $G = \cos^n(u) = 1/18$

Однак, точність відтворення зони затухання залишається недостатньо високою. Тому запропоновано комбінування (2023) [26] даної функції у зоні епіцентру із додатковою кубічною функцією у зоні затухання.

Коефіцієнти  $A_2, B_2, C_2$  додаткової кубічної моделі обчислюються

$$\begin{cases} A_2 = 0.5 \frac{LR(R-L) + GR(2E^2 - R2E) + LQ(L2E - 2E^2)}{L^3(RE^2 - R^2E) + L^2(R^3E - RE^3) - LR^2(RE^2 - E^3)} \\ B_2 = 0.5 \frac{GR(R^22E - 2E^3) + LR(L^2 - R^2) + QL(2E^3 - L^22E)}{L^3(RE^2 - R^2E) + L^2(R^3E - RE^3) - LR^2(RE^2 - E^3)} \\ C_2 = 0.5 \frac{GR(R2E^3 - R^22E^2) + L^2Q(L2E^2 - 2E^3) + LR(LR^2 - L^2R)}{L^3(RE^2 - R^2E) + L^2(R^3E - RE^3) - LR^2(RE^2 - E^3)} \end{cases}$$

де  $Q = \cos^n(t) = 0.1$ ,  $G = \cos^n(u) = 1/40$ ,  $E = e^{-0.693/n}$

Абсциса точки з'єднання функцій обчислюється за формулою

$$a \cos(e^{-0.693/n})$$

На рис. 10 (а) зображено графіки комбінованої косинус-степеневі ДФВЗ ( $f_{416}$ ), 10 (б) - квадратично-кубічної ДФВЗ ( $f_{23}$ ), 10(с) - комбінованої кубічної ДФВЗ( $f_{33}$ ) порівняно з еталонною ДФВЗ Блінна-Фонга  $f_b$  при  $n = 50$ .



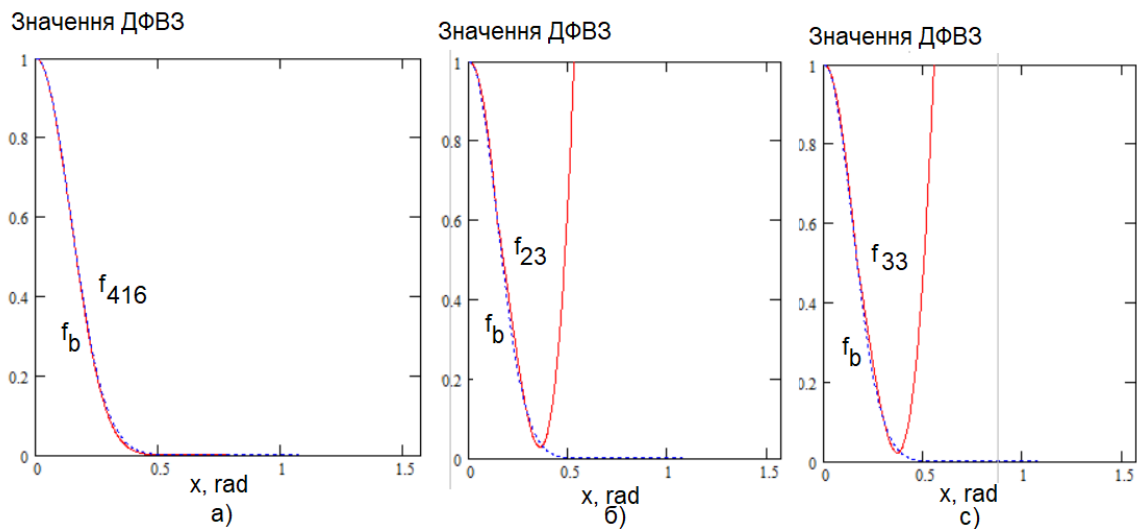


Рис. 10. Графіки  $f_{416}$  (а),  $f_{23}$  (б),  $f_{33}$  (с) порівняно з  $f_b$  при  $n = 50$

Як показано на рисунку, при застосуванні розглянутих комбінованих функцій важливим є їх обнулення на інтервалах зростання.

Розглянуті апроксимації моделі Блінна-Фонга полягають у оперуванні з косинусом кута. Альтернативним підходом є використання апроксимаційних функцій на основі визначення кута між векторами.

Прикладом є запропонований енергетично-коректний вираз (2023) [27]

$$coef(n) \cos^k \left( \sqrt{\frac{0.95n}{k}} \psi \right),$$

де  $k$  - невелика степінь (рекомендовано [1, 5]),

$$coef(n) = \left( \left( \frac{0.11}{k - 0.07} + 0.15 \right) (n - 0.48) + 0.28 \right)$$

Енергетично-коректна модель (2023) іншої форми має вигляд [28]

$$coef(n) \cos^k \left( \frac{a \cos \left( e^{\frac{\ln Q}{k}} \right)}{a \cos(\text{signum}(Q)^n |Q|^{\frac{1}{n}})} \psi \right),$$

де  $Q \in [0.1, 0.9]$ ,

$$coef(n) = \begin{cases} \frac{0.608n(Q - 0.193)}{2Q + 2k} + 0.161n + 0.284, & Q \in [0.1, 0.4] \\ \frac{0.743Q(-0.0133kn + 0.167n)}{k} + 0.167n + 0.245, & Q \in [0.5, 0.9] \end{cases}$$

На рис. 11. зображено візуалізовані фігури «Чайник» у програмному засобі BRDFExplorer на основі нових феноменологічних моделей: комбінованої косинус-степеневі ДФВЗ, модифікованої ДФВЗ Шліка, комбінованої кубічної ДФВЗ, квадратично-кубічної ДФВЗ, логарифмічної ДФВЗ, апроксимаційної ДФВЗ Лагарде.

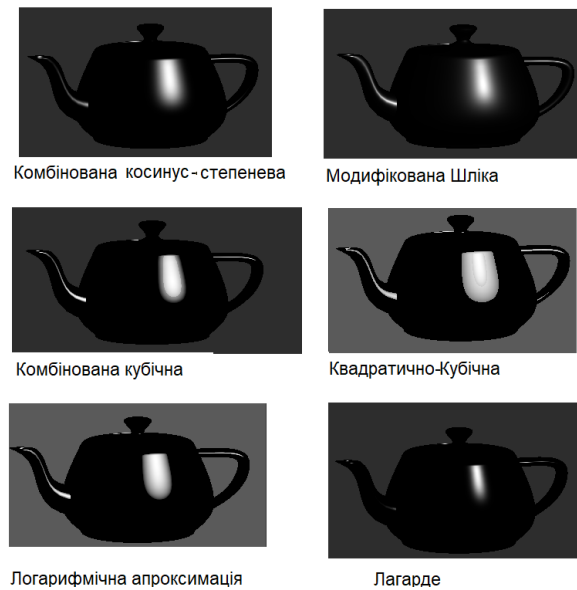


Рис. 11. Візуалізовані фігури «Чайник» на основі нових феноменологічних ДФВЗ

**Нові теоретичні моделі відбиття.** ДФВЗ Курта (2010) [5, 29] передбачає використання нормалізованого розподілу Бекмана для фізично-коректного моделювання відбиття світла. Забезпечується можливість подання анізотропних матеріалів. Залежно від типу поверхні об'єкта, можливий вибір від однієї до  $N$  спекулярних пелюсток(у випадку багат шарового матеріалу). Модель обчислюється за формулою

$$\frac{\rho_d}{\pi} + \sum_{l=1}^N \frac{\rho_s D_l(\vec{H}) F(\vec{V}, \vec{H})}{4(\vec{V} \cdot \vec{H})(\cos \theta_l \cos \theta_o)^{\alpha_l}},$$

де  $D_l$  – нормалізований розподіл Бекмана для окремої спекулярної пелюстки,  $\alpha_l$  – параметр для забезпечення збереження енергії.

ДФВЗ Disney (ДФВЗ Бьорлі) (2012) [8, 30] є однією з найбільш поширених теоретичних моделей і включає розрахунок дифузної та спекулярної складової. При розробці моделі враховувались задачі: використання інтуїтивно зрозумілих параметрів, незначна кількість параметрів, значення параметрів повинні відповідати діапазону 0-1, правдоподібність комбінацій параметрів.

Дифузна складова розширює модель відбиття Ламберта. Здійснюється регулювання відбивної здатності поверхні при освітленні, майже паралельному поверхні (кути ковзання). Використовується формула

$$\frac{\rho_d}{\pi} (1 + (F_{D90} - 1)(1 - \cos \theta_i)^5)(1 + (F_{D90} - 1)(1 - \cos \theta_o)^5)$$

де  $F_{D90} = 0.5 + 2RGH \cdot \cos^2 \theta_d$ ,  $RGH$  – шорсткість,  $\theta_d$  – «різницьвий» кут між напіввектором і вектором освітлення.

Спекулярна складова є мікрофасетною моделлю на основі ДФВЗ Кука-Торренса. Використовуються дві дзеркальні пелюстки з узагальненим розподілом  $D$  Тровбріджа-Рейтца (GTR)

$$\frac{c}{(\alpha^2 \cos^2 \theta_h + \sin^2 \theta_h)^\gamma}$$

де  $c$  – константа масштабування,  $\alpha = RGH^2$ ,  $\theta_h$  – зенітний кут серединного вектора,  $\gamma$  – значення степеня (2 для головної пелюстки, 1 для вторинної).

Нормалізований відносно напівсфери розподіл GTR при  $\gamma = 1$  має вид

$$\frac{\alpha^2 - 1}{\pi \log \alpha^2} \frac{1}{(1 + (\alpha^2 - 1) \cos^2 \theta_h)}$$

При  $\gamma = 2$  нормалізований розподіл GTR розраховується за формулою

$$\frac{\alpha^2}{\pi} \frac{1}{(1 + (\alpha^2 - 1) \cos^2 \theta_h)^2}$$

У випадку необхідності моделювання анізотропного відбиття світла застосовується анізотропна версія ДФВЗ Disney

$$\frac{1}{\pi} \frac{1}{\alpha_x \alpha_y} \frac{1}{((\vec{H} \cdot \vec{X})^2 / \alpha_x^2 + (\vec{H} \cdot \vec{Y})^2 / \alpha_y^2 + \cos^2 \theta_h)^2}$$

де  $\vec{X}, \vec{Y}$  – відповідно тангенціальний і бітангенціальний вектори,  $\vec{H} \cdot \vec{X} = \sin \theta_h \cos \phi$ ,  $\vec{H} \cdot \vec{Y} = \sin \theta_h \sin \phi$ . Просторові параметри шорсткості  $\alpha_x, \alpha_y$  визначаються як

$$\alpha_x = RGH^2 / \sqrt{1 - 0.9AIS}; \alpha_y = RGH^2 \cdot \sqrt{1 - 0.9AIS}$$

де  $AIS$  – параметр анізотропії.

Для наближеного розрахунку фактора Френеля  $F$  застосовано апроксимацію Шліка. Для розрахунку  $G$  використано функцію затінення Сміта, запропоновану Вальтером для GGX розподілу. При чому, шорсткість було приведено до інтервалу значень  $[0.5, 1]$  для кращої сумісності моделі з вимірними даними та експертними оцінками.

Для побудови матеріалу на основі даної моделі застосовується набір параметрів: baseColor (основний колір поверхні), subsurface (контроль дифузної форми), metallic (рівень «металічності» поверхні), specular (інтенсивність спекулярних відблисків), specularTint (поєднання specular із основним кольором поверхні), roughness (шорсткість поверхні), anisotropic (рівень анізотропії), sheen (компонент блисків для поверхонь одягу), sheenTint (поєднання sheen із основним кольором), clearcoat (друга дзеркальна пелюстка), clearcoatGloss (блискучість clearcoat).

Зазначена модель матеріалу широко використовується у програмних засобах тривимірного рендерингу. Наприклад, модель є базовою для Principled BSDF у засобі Blender.

Модель відбиття Багера (2012) [5, 31-32] базується на використанні зсунутого Гамма-розподілу (SGD) для подання орієнтацій мікрофасет. Основою моделі є ДФВЗ Кука-Торренса. За рахунок використання SGD розподілу забезпечується достатньо точне моделювання відбивної здатності більшості спекулярних і дифузних матеріалів бази MERL. SGD-розподіл обчислюється згідно з виразом

$$\frac{\chi[0; \pi/2](\theta_m)}{\pi \cos^4 \theta_m} P_{22}(\tan^2 \theta_m)$$

$\chi[0; \pi/2](\theta_m)$  дорівнює 1, якщо  $\theta_m < \pi/2$  та 0, якщо  $\theta_m \geq \pi/2$ .  $\theta_m$  є кутом між нормаллями мікроповерхні та макроповерхні. Функція  $P_{22}$  обчислюється за формулою

$$P_{22}(x) = \frac{\alpha^{p-1} e^{\frac{-\alpha^2+x}{\alpha}}}{\Gamma(1-p, \alpha) (\alpha^2+x)^p}$$

де  $P$  – параметр моделі,  $\Gamma(s, x) = \int_x^\infty t^{s-1} e^{-t} dt$

Для обчислення функції ослаблення світла  $G_1$  застосовується формула

$$G_1(\theta) = \frac{\chi[0; \pi/2](\theta)}{1 + \Lambda(\theta)}$$

де  $\Lambda(\theta) = \int_{\frac{1}{\tan \theta}}^\infty (r \tan \theta - 1) \left( \frac{1}{\sqrt{\pi \alpha} \Gamma(1-p, \alpha)} U\left(p, p + \frac{1}{2}, \alpha + \frac{r^2}{\alpha}\right) e^{-\alpha \frac{r^2}{\alpha}} \right) dr$  ( $U$  – конфлуентна гіпергеометрична функція другого типу).

Даний вираз рекомендовано обчислювати попередньо. Інакше, використовується апроксимаційна формула

$$G_1(\theta) = \begin{cases} 1 + \lambda(1 - e^{c(\theta-\theta_0)^k}), & \theta > \theta_0 \\ 1, & \theta \leq \theta_0 \end{cases}$$

де  $\theta_0 = \pi/2 - (\log(1+1/\lambda)/c)^{1/k}$  (параметри  $\lambda, c, k$  знаходяться шляхом апроксимації попередньо обчислених значень).

Коефіцієнт Френеляу моделі Багера розраховується за формулою

$$(m(\vec{L}, \vec{V}) - \frac{\rho_d}{\pi}) \frac{\pi \cos \theta_i \cos \theta_o}{\rho_s D(\theta_h) G_1(\theta_i) G_1(\theta_o)}$$

де  $m(\vec{L}, \vec{V})$  – вимірні дані відбивної здатності поверхні.

Модель Льова (2012) [5, 32-33] включає дві параметричні ДФВЗ для подання склянистих поверхонь. Передбачається розрахунок АВС-функції згідно з виразом

$$S(f) = \frac{A}{(1 + Bf^2)^C}$$

де  $A$  визначає низькочастотну спектральну щільність,  $B$  визначає форму спекулярних піків,  $C$  визначає швидкість зменшення ширококутового розсіювання.

Перша ДФВЗ базується на теорії Релея-Райса розсіювання світла відносно гладких поверхонь. Використовується спроектований вектор відхилення  $\vec{D}_p$  між спроектованими векторами  $\vec{V}, \vec{R}$  як альтернативна серединному вектору  $\vec{H}$ . У ДФВЗ враховуються Ламбертівська дифузна складова, коефіцієнт нахиленості поверхні, коефіцієнт поляризації та АВС-функція. Модель обчислюється за формулою

$$\frac{\rho_d}{\pi} + S(\|\vec{D}_p\|)G'Q'$$

де  $G'$  - коефіцієнт нахиленості поверхні,  $Q'$  - коефіцієнт поляризації,  $Q' = F(\theta_d; \eta)$  (кут  $\theta_d$

обчислюється відносно спроектованих векторів  $\vec{V}, \vec{L}$  -  $\arcsin(\frac{\|\vec{L}_p - \vec{V}_p\|}{2})$ ).

Друга ДФВЗ використовується для подання відбивної здатності мікрофасетних поверхонь. Модель обчислюється згідно з виразом

$$\frac{\rho_d}{\pi} + \frac{S(\sqrt{1 - \cos \theta_h})F(\theta_h; \eta)G}{\cos \theta_i \cos \theta_o}$$

С. Лагарде запропоновано оптимізоване обчислення апроксимації Шліка [8, 16] (2012) для коефіцієнта Френеля мікрофасетної моделі згідно з експоненціальним виразом

$$F = F_0 + (F_{90} - F_0) \cdot 2^{(-5.55473 \cos \theta_h - 6.983146) \cos \theta_h}$$

ДФВЗ Richardson (2013) [34] базується на моделях Кука-Торренса та Вальтера і використовує модифікований розподіл мікрофасетБекмана, де вилучено обчислення тангенса. ДФВЗ обчислюється за формулою

$$\frac{e^{\frac{\cos^2 \theta_h - 1}{\alpha^2 \cos^2 \theta_h}}}{4\pi\alpha^2 \cos^3 \theta_h \cos x_{vh}}$$

де  $x_{vh}$  - кут між векторами  $\vec{V}, \vec{H}$ .

Д. Нобелтом і М. Петтінео (2013) [35, 36] наведено ряд ДФВЗ для візуалізації кадрів гри The Order: 1866.

Базова «ядерна» ДФВЗ передбачає використання GGX розподілу мікрофасет, функції Сміта для обчислення геометричної складової ослаблення світла.

ДФВЗ для подання поверхні одягу характеризується згладженим знаменником і використанням нормалізованого оберненого Гауссівського розподілу мікрофасет («оксамитового» розподілу). Використовується вираз

$$(1 - F(\vec{V}, \vec{H})) \frac{\rho_d}{\pi} + \frac{F(\vec{V}, \vec{H})D_{velvet}(\vec{V}, \vec{H}, \alpha)}{4(\cos \theta_i + \cos \theta_o - \cos \theta_i \cos \theta_o)}$$

«Оксамитовий»  $D_{velvet}$  обчислюється за формулою

$$\frac{1}{\pi(1 + 4\alpha^2)} \left( 1 + 4 \frac{\exp\left(\frac{-\cot^2 \theta_h}{\alpha^2}\right)}{\sin^4 \theta_h} \right)$$

Для подання поверхні шкіри застосовано дифузну ДФВЗ

$$\sum_{l=0}^2 \sum_{m=-1}^1 \sqrt{\frac{4\pi}{2l+1}} D_l(r) L_{l,m} Y_{l,m}(\vec{N})$$

де  $r$  – радіус, рівний кривизні поверхні,  $Y$  – базисні функції сферичних гармонік,  $L$  - коефіцієнти

$$D_l(r) = 2\pi \int_0^{\pi/2} Y_{n,o}(\theta) D(\theta, r) \sin(\theta) d\theta$$

сферичних гармонік для подання середовища освітлення, (коефіцієнти зональних сферичних гармонік),

$$D(\theta, r) = \int_{-\pi}^{\pi} \cos(\theta + x) R(2r \sin(x/2)) dx / \int_{-\pi}^{\pi} R(2r \sin(x/2)) dx$$

,  $\theta$  – кут між напрямом освітлення і нормаллю до точки на поверхні сфери,  $R$  – дифузний профіль шкіри (подає поширення світла поверхнею).

Анізотропна модель побудована на основі анізотропної ДФВЗ Disney і включає нові формули розрахунку параметрів  $\alpha_x, \alpha_y$ .

$$\alpha_x = \alpha; \alpha_y = \text{lerp}(0, \alpha, 1 - AIS)$$

де  $\alpha$  – шорсткість,  $AIS$  – параметр анізотропії.

Бреді та ін. (2014) [5, 37] було запропоновано фреймворк для відкриття формул ДФВЗ на основі генетичних алгоритмів. Було проведено ряд експериментів: відкриття формули ДФВЗ, відкриття формули спекулярної складової ДФВЗ, відкриття формули компонента ДФВЗ, який включає розподіл мікрофасет і геометричну складову ослаблення світла. Відкриття формул здійснювалось, використовуючи дані матеріалів бази MERL. Всього було отримано більше 100 варіантів можливих нових ДФВЗ. Наприклад, було отримано вираз  $n_R$  для розрахунку складових мікрофасетної моделі  $D$  і  $G$

$$\frac{\cos \theta_o \cos \theta_i}{(\vec{L} \cdot \vec{H})} D$$

Розподіл мікрофасет  $D'$  розраховується як

$$e^{-(\tan \delta / \beta^2)^\alpha}$$

де  $\alpha, \beta$  – параметри контролю форми спекулярної пелюстки.

При підстановці  $n_R$  у повний вираз мікрофасетної моделі отримується більш проста формула ДФВЗ

$$\frac{k_d}{\pi} + k_s \frac{DF}{4(\vec{L} \cdot \vec{H})}$$

При тестуванні дана модель показала більш точне подання відбивних властивостей 20 з 40 матеріалів MERL. У той же час, ДФВЗ Льова була найбільш точною для 10 матеріалів.

ДФВЗ Джейкоба (2014) [5, 38] базується на заміні неперервного розподілу мікрофасет дискретним, що дозволяє більш реалістично подавати особливості відбиття світла від негладких металічних поверхонь. При цьому, враховується площа навколо точки падіння світла на поверхню. ДФВЗ Джейкоба обчислюється за формулою

$$\frac{(\vec{L} \cdot \vec{H})D(A, w_h)F(\vec{L} \cdot \vec{H})G(\vec{L}, \vec{V}, \vec{N})}{a(A)\sigma(w_r)\cos \theta_i \cos \theta_o}$$

$w_r$  – скінченний тілесний кут навколо  $\vec{V}$ ,  $\sigma(w_r)$  – площа  $w_r$ ,  $A$  – ділянка навколо точки падіння,  $a(A)$  – площа даної ділянки,  $w_h$  – набір напіввекторів мікрофасет, звідки відбивається світло у межах  $w_r$  навколо  $\vec{V}$ .

Дискретний розподіл  $D(A, w_h)$  визначається як

$$\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N 1_{w_h}(v_h^k) 1_A(p^k)$$

$N$  – кількість мікрофасет,  $p^k$  – позиція окремої мікрофасети,  $v_h^k$  – нормаль окремої мікрофасети,  $1_{w_h}$ ,  $1_A$  – функції контролю вигляду поверхні.

Д. Хейтцем (2014) [35, 39-40] показано, що для розрахунку функції ослаблення світла  $G$  доцільним є застосування функції Сміта. Для більш точного подання ефектів маскування та затінення наведено вираз розрахунку  $G$ , що враховує висоти мікрофасет. Вираз має вид

$$\frac{\chi^+(\vec{V} \cdot \vec{H})\chi^+(\vec{L} \cdot \vec{H})}{1 + \Lambda(\vec{V}) + \Lambda(\vec{L})}$$

$$\Lambda(m) = \frac{-1 + \sqrt{1 + \alpha^2 \frac{(1 - \cos^2 \theta_m)}{\cos^2 \theta_m}}}{2}$$

де

Складову мікрофасетної моделі  $\frac{G}{4 \cos \theta_i \cos \theta_o}$  можливо подати як функцію видимості  $V$  [35]. Тоді, з врахуванням оновленої формули  $G, V$  обчислюється за формулою

$$\frac{0.5}{\vec{N} \cdot \vec{L}(\vec{N} \cdot \vec{V}(1 - \alpha) + \alpha) + \vec{N} \cdot \vec{V}(\vec{N} \cdot \vec{L}(1 - \alpha) + \alpha)}$$

Схожий вираз розрахунку складової  $V$  мікрофасетної моделі відбиття було запропоновано Е. Хаммоном (2017) [35, 41]. Вираз відрізняється тим, що для обчислення складової знаменника застосовується лінійна інтерполяція  $lerp$ . Обчислення здійснюється згідно з формулою

$$\frac{0.5}{lerp(2(\vec{N} \cdot \vec{L})(\vec{N} \cdot \vec{V}), \vec{N} \cdot \vec{L} + \vec{N} \cdot \vec{V}, \alpha)}$$

ДФВЗ Вонга (2015) [42] застосовується для подання відбивних властивостей металічних матеріалів. Модель, подібно до моделі Хе-Торренса, полягає у виокремленні ідеального дифузного відбиття та направлено дифузного відбиття. Складова направлено дифузного відбиття  $f_{dd}$  подає багаторазове відбиття світла на шорсткій поверхні та моделюється за допомогою Гауссівського розподілу

$$f_{dd} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\alpha_m}} \exp(-\theta_o^2 / 2\alpha_m^2)$$

де  $\alpha_m$  встановлюється відповідно до експериментальних даних.

Складова ідеального дифузного відбиття подає однорідне відбиття світла по напівсфері та є незмінною

$$f_{id} = 1$$

Спекулярна складова моделі включає розрахунок розподілу мікрофасет і визначається як

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{4\alpha^2} \frac{1}{\cos^4 x_{nN}} \frac{\exp(-\tan^2 x_{nN} / 2\alpha^2)}{\cos \theta_o \cos \theta_i} G(\theta_i, \theta_o, \varphi)$$

де  $x_{nN}$  – кут між нормальми мікрофасети та макроповерхні.

Повністю ДФВЗ Вонга обчислюється як сума компонентів ідеального дифузного, направлено дифузного та спекулярного відбиття

$$f = k_{dd} f_{dd} + k_{id} f_{id} + k_s f_s,$$

де  $k_{dd}$  – коефіцієнт направлено дифузного відбиття,  $k_{id}$  – коефіцієнт ідеального дифузного відбиття,  $k_s$  – коефіцієнт спекулярного відбиття.

Недоліком ДФВЗ Кука-Торренса є те, що не враховується багаторазове розсіювання світла. Як наслідок, втрачається енергія освітлення при великій шорсткості поверхні. Це призводить до затемнених поверхонь матеріалів. Тому модель відбиття повинна враховувати втрати у енергії. Наприклад, ДФВЗ Кулла-Конті (2017) [35, 43] включає компонент компенсації втрат енергії, що відповідає додатковій спекулярній пелюстці  $f_{ms}$ . Компонент розраховується за формулою



$$f_{ms}(\vec{L}, \vec{V}) = \frac{(1 - E(\vec{L}))(1 - E(\vec{V}))F_{avg}^2 E_{avg}}{\pi(1 - E_{avg})(1 - F_{avg}(1 - E_{avg}))}$$

де  $E(\vec{L}) = \int_{\Omega} f(\vec{L}, \vec{V}) \cos \theta_o dv$  ( $f(\vec{L}, \vec{V})$  - ДФВЗ),  $E_{avg} = 2 \int_0^1 E(\mu) \mu d\mu$ ,  $F_{avg} = 2 \int_0^1 F(\mu) \mu d\mu$  ( $F$  - коефіцієнт Френеля).

Повна ДФВЗ Кулла-Конті обчислюється за формулою

$$f_r(\vec{L}, \vec{V}) = f_{ss}(\vec{L}, \vec{V}) + f_{ms}(\vec{L}, \vec{V})$$

де  $f_{ss}(\vec{L}, \vec{V})$  – оригінальна модель, що враховує лише одноразове розсіювання світла.

ДФВЗ Лагарде (2018) [35, 44] забезпечує компенсацію втрат енергії за рахунок введення додаткової спекулярної пелюстки GGX  $f_{ms}$

$$f_{ms}(\vec{L}, \vec{V}) = F_0 \left( \frac{1}{r} - 1 \right) f_{ss}(\vec{L}, \vec{V})$$

$$r = \int_{\Omega} D(\vec{L}, \vec{V}) V(\vec{L}, \vec{V}) \cos \theta_i d\vec{L}$$

де

Повна ДФВЗ Лагарде розраховується аналогічно до ДФВЗ Кулла-Конті.

У ДФВЗ Конті-Кулла(2017) [35, 45] використовується вдосконалений NDF-розподіл «Чарлі» на основі степеневі синусоїдальної функції. Розподіл розраховується за формулою

$$D(m) = \frac{(2 + \frac{1}{\alpha}) \sin^{\frac{1}{\alpha}} \theta}{2\pi}$$

Функція ослаблення затухання світла обчислюється згідно з виразом

$$\frac{1}{1 + \Lambda(\vec{V}) + \Lambda(\vec{L})}$$

де  $\Lambda(\theta) = \begin{cases} e^{L(\cos \theta)}, \cos \theta < 0.5 \\ e^{2L(0.5) - L(1 - \cos \theta)}, \cos \theta \geq 0.5 \end{cases}$ ,  $L(x) = \frac{a}{(1 + bx^c)} + dx + e$  ( $a, b, c, d, e$  є підібраними коефіцієнтами).

Модель використовується для моделювання зворотного розсіювання світла від мікрОВОЛОКОН поверхні одягу.

Поляриметрична ДФВЗ Кондо (2020) [46, 47] забезпечує врахування поляризації світла при моделюванні дифузного та спекулярного відбиття променів. Використовується формула

$$k_s \frac{D(\theta_h; \alpha) G(\theta_i, \theta_o, \alpha) F_s}{4 \cos \theta_o \cos \theta_i} \cos \theta_i + (k_{pd} F_d + k_d) \cos \theta_i$$

де  $k_{pd}$  – коефіцієнт поляризованого дифузного відбиття,  $k_d$  – коефіцієнт неполяризованого дифузного відбиття,  $k_s$  – коефіцієнт спекулярного відбиття,  $F$  – коефіцієнт Френеля,  $D$  – GGX розподіл.

На основі розробленої ДФВЗ авторами було побудовано рендерер поляризованих зображень. Отримані зображення було використано при тренуванні нейромережевої системи для передбачення нормалей об'єкта відносно зображення. У результаті, підвищено точність передбачення нормалей на 70%.

ДФВЗ Ічікави FMBRDF (2021) [48] дозволяє поєднати в одній моделі мікрофасетне дифузне та мікрофасетне спекулярне відбиття світла від поверхні, поляризацію світла, переміщення світла в межах мікрогеометрії, Френелівське пропускання світла. При цьому, для моделювання дифузного та спекулярного відбиття застосовується єдиний набір дзеркальних мікрофасет.

Спекулярна складова базується на ДФВЗ Торренса-Сперроу й обчислюється за формулою

$$k_s \frac{D(\theta_h) G(\vec{H})}{4 \cos \theta_o} C(\varphi_o, s) R(\theta_d) C(-\varphi_i, s) s_i$$

де  $\theta_d$  – кут освітлення мікрофасети,  $R(\theta_d)$  – Френелівське відбиття,  $s_i$  – вектор падіння світла Стокса,  $C$  – матриця ротації для визначення напрямку поляризації світла,  $\varphi_{\{i,o\}}, s$  – кут між  $y_{\{i,o\}}$  і вектором  $\vec{H}$ , спроектованим на площину  $x_{\{i,o\}} y_{\{i,o\}}$  (осі координатної системи падаючого (вихідного) світла).

Для розрахунку  $G$  використано функцію Сміта. Для обчислення  $D$  застосовано узагальнений нормальний розподіл

$$D(\theta_h) = \exp(-(\theta_h / \alpha)^\beta)$$

Дифузна складова розраховується за формулою

$$\frac{1}{\cos \theta_o} \iint_{\Omega} G_m(\vec{n}) D(x_{nN}) \cos x_{nV} C(\varphi_o, b) T(x_{nV}) \cdot D_p \left( \frac{k_d}{\pi} \right) f(\vec{n}, \vec{n}_i) G_s(\vec{n}_i) D(x_{n_iN}) \cos x_{n_iL} T(x_{n_iL}) C(\varphi_i, b) dw_n dw_{n_i} s_i$$

де  $\vec{n}$  – нормаль мікрофасети,  $\vec{n}_i$  – нормаль  $i$ -ї мікрофасети, що передає світло,  $f(\vec{n}, \vec{n}_i) = \exp(k \cdot (\vec{n}_i \cdot \vec{n}))$  – функція кореляції мікрофасет ( $k$  – параметр концентрації),  $G_m(\vec{n})$  – середнє бінарних маскувальних функцій у точках мікрофасет,  $G_s(\vec{n}_i)$  – середнє бінарних маскувальних функцій у точках мікрофасет, що передають світло,  $T(\theta)$  – Френелівське пропускання неполяризованого світла під визначеним кутом,  $\varphi_{\{i,o\}}, b$  – кут між  $y_{\{i,o\}}$  і вектором  $\vec{n}_i / \vec{n}$ , спроектованим на площину  $x_{\{i,o\}} y_{\{i,o\}}$ ,  $D_p$  – матриця деполіризації міжповерхневим розсіюванням,  $x_{nN}, x_{nV}, x_{n_iL}$  – кут між нормаллю мікрофасети і векторами  $\vec{N}, \vec{V}, \vec{L}$  відповідно.

На рис. 12. зображено візуалізовані фігури «Чайник» у програмному засобі BRDF Explorer на основі нових теоретичних моделей: ДФВЗ Disney, ДФВЗ Бреді, ДФВЗ Кука-Торренса на основі апроксимації Лагарде коефіцієнта Френеля.

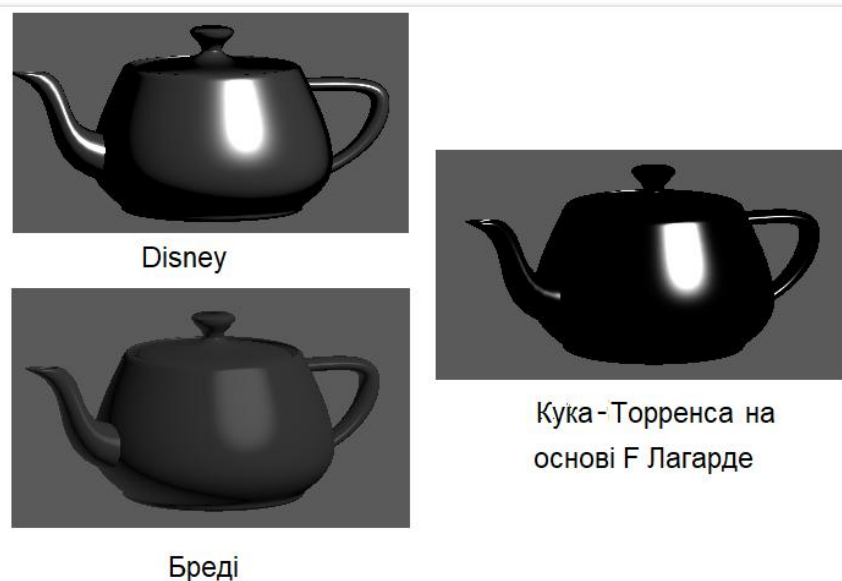


Рис. 12. Візуалізовані фігури «Чайник» на основі нових теоретичних ДФВЗ

**Висновок.** У роботі розглянуто нові феноменологічні та мікрофасетні моделі освітлення на основі двопробних функцій відбивної здатності. Серед найбільш популярних напрямків розробки нових моделей можна виокремити розробку енергетично-коректних емпіричних моделей і вдосконалення виразів для розрахунку розподілу мікрофасет, функції ослаблення світла, коефіцієнта Френеля у теоретичних моделях.

#### Джерела

1. Романюк О. Н., Романюк О. В., Чехмestрук Р. Ю. Комп'ютерна графіка : електронний навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2023. 147 с. URL: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/37689>.
2. Романюк О. Н., Чорний А. В. Високопродуктивні методи та засоби зафарбовування тривимірних графічних об'єктів. Вінниця: УНІВЕСУМ-Вінниця, 2006. 190 с.
3. Романюк О. Н. Класифікація дистрибутивних функцій відбивної здатності поверхні. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія : Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка*. 2008. № 9. С. 145-151.
4. Zhou Y. An overview of BRDF models in computer graphics. *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: 20.07.2024).
5. 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: 20.07.2024).
6. Montes R., Ureña C. An Overview of BRDF Models. Granada : University of Granada, 2012. 26 p.
7. Pelikán J. Reflectance Models (BRDF). *Computer Graphics Group*. URL: <https://cgg.mff.cuni.cz/~pepca/lectures/pdf/pg2-05-brdf.en.pdf> (date of access: 20.07.2024).
8. Boksansky J. Crash Course in BRDF Implementations. Nvidia, 2021. 25 p.
9. Phong B. T. Illumination for computer generated pictures. *Communications of the ACM*. 1975. Vol. 18, no. 6. P. 311-317.
10. Ward G. J. Measuring and Modeling Anisotropic Reflection. *Computer Graphics*. 1992. Vol. 26, no. 2. P. 265-272.
11. Cook R. L., Torrance K. E. A Reflectance Model for Computer Graphics. *ACM Transactions on Graphics*. 1982. Vol. 1, no. 1. P. 7-24.
12. Stam J. Diffraction Shaders. *26th SIGGRAPH 1999*, Los Angeles, 13 August 1999. New York, 1999. P. 101-110.
13. Романюк О. Н., Чан А. Л. В., Денисюк А. В. Аналіз моделі Лебедева для аналітично-сіткової апроксимації BRDF. *Інформаційно-комп'ютерні технології – 2021*, м. Житомир, 01 – 03 квітня. 2021 р. Житомир, 2021. С. 27-28.
14. Чан А. Л. В., Романюк О. Н. Аналіз нових моделей відбивних здатностей поверхонь у комп'ютерній графіці. *Матеріали Наукової конференції підрозділів ВНТУ*, м. Вінниця, 10 – 12 березня. 2021 р. Вінниця, 2021. С. 781-784.
15. Gotanda Y. Physically Based Shading Models in Film and Game Production: Practical Implementation at tri-Ace. *RenderWrok*. URL: [https://renderwrok.com/publications/s2010-shading-course/gotanda/course\\_note\\_practical\\_implementation\\_at\\_triace.pdf](https://renderwrok.com/publications/s2010-shading-course/gotanda/course_note_practical_implementation_at_triace.pdf) (date of access: 20.07.2024).
16. Geisler-Moroder D., Dür A. A new ward brdf model with bounded albedo. *Computer Graphics Forum*. 2010. Vol. 29, no. 4. P. 1391-1398.
17. Lagarde S. Spherical Gaussian approximation for Blinn-Phong, Phong and Fresnel. *SebLagarde*. WordPress. URL: <https://seblagarde.wordpress.com/2012/06/03/spherical-gaussian-approximation-for-blinn-phong-phong-and-fresnel/> (date of access: 20.07.2024).
18. Завальнюк Є. К., Романюк О. Н., Войтко В. В., Романюк О. В., Снігур А. В. Розробка модифікованої моделі Шліка для визначення спекулярної складової кольору. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2022. Том. 55, № 3. С. 4-12. URL: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2022-55-3-4-12> (date of access: 20.07.2024).
19. Завальнюк Є. К., Романюк О. Н., Павлов С. В., Шевчук Р. П., Коробейнікова Т. І. Розробка фізично коректної моделі відбиття другого степеня. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2022. Том. 44, № 2. С. 19-25. URL: <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2022-44-2-19-25> (date of access: 20.07.2024).

20. Romanyuk O., Zavalniuk Y., Romanyuk O., Snigur A., Titova N., Maidaniuk V. The Development of Physically Correct Reflectance Model Based on Logarithm Function 2023 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Wrocław, Poland, 21–23 September 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/acit58437.2023.10275589> (date of access: 20.07.2024).
21. Павлов С. В., Романюк С. О., Романюк О. Н., Мельник О. В. Модель для відтворення спекулярної складової кольору в засобах комп'ютерної графіки. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2015. Том. 34, № 3. С. 50-57.
22. Романюк О. Н., Абрамчук І. В., Кириляшук С. А., Романюк С. О. Моделювання спекулярного складника кольору з використанням енергетично-коректних моделей відбивних здатностей поверхонь. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2019. Том. 30 (69), №3, частина 1. С. 153-157.
23. Romanyuk O. N., Zavalniuk Y. K., Chekhmestruk R. Y., Mykhaylov P. I., Hamza A. Combined bidirectional reflectance distribution functions usage for increasing images creation productivity. *Applied Aspects of Information Technology*. 2023. Vol. 6, № 2. P. 130-138. URL: <https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.9> (date of access: 20.07.2024).
24. Романюк О. Н., Ляшенко Ю. Л. Квадратична апроксимація BRDF. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2007. №1. С. 67-69.
25. Romanyuk O., Zavalniuk Y., Titova N., Kaduk O., Wójcik W., Kalimoldayev M., Shermantayeva Z. Optical system visualization of combined reflectance model based on cubic and quadratic functions. *Optical Fibers and Their Applications 2023*, Lublin, Poland, 11–14 September 2023 / ed. by Z. Omiotek, A. Smolarz, W. Wójcik. 2023. URL: <https://doi.org/10.1117/12.3023138> (date of access: 20.07.2024).
26. Romanyuk O., Zavalniuk Y., Pavlov S., Chekhmestruk R., Bondarenko Z., Koval T., Kalizhanova A., Iskakova A. New Surface Reflectance Model With the Combination of Two Cubic Functions usage. *Informatyka, Automatyka, Pomiaru w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2023. Vol. 13, no. 3. P. 101-106. URL: <https://doi.org/10.35784/iapgos.5327> (date of access: 20.07.2024).
27. Завальнюк Є. К., Романюк О. Н., Снігур А. В., Шевчук П. П. Розробка фізичнокоректної моделі відбиття світла на основі розрахунку кута між векторами. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка*. 2022 – 2023. Том 35 – 36, № 2 – 1. С. 45-50. URL: <https://doi.org/10.31474/1996-1588-2023-1-36-45-50> (date of access: 20.07.2024).
28. Завальнюк Є. К., Романюк О. Н., Прозор О. П., Снігур А. В. Енергетично-коректна модель освітлення, основана на розрахунку кута між векторами. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2023. Том. 56, №1. С. 75-82. URL: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-56-1-75-82> (date of access: 20.07.2024).
29. Kurt M., Szirmay-Kalos L., Krivanek J. An Anisotropic BRDF Model for Fitting and Monte Carlo Rendering. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*. 2010. Vol. 44, no. 1. P. 3:1-3:15.
30. Burley B. Physically Based Shading at Disney. *Self Shadow*. URL: [https://blog.selfshadow.com/publications/s2012-shading-course/burley/s2012\\_pbs\\_disney\\_brdf\\_notes\\_v3.pdf](https://blog.selfshadow.com/publications/s2012-shading-course/burley/s2012_pbs_disney_brdf_notes_v3.pdf) (date of access: 21.07.2024).
31. Bagher M. M., Soler C., Holzschuch. Accurate fitting of measured reflectances using a Shifted Gamma micro-facet distribution. *Computer Graphics Forum*. 2012. Vol. 31, no. 4. P. 1509-1518.
32. Завальнюк Є. К., Станіславенко Є. Г., Вінтонюк В. В., Васянович Є. А., Романюк О. Н. Аналіз нових фізично-точних двопробневих функцій відбивної здатності. *The 9th International scientific and practical conference "Modern research in world science"*, м. Львів, 28 – 30 листоп. 2022 р. Львів, 2022. С. 480-483.
33. Löw J., Kronander J., Ynnerman A., Unger J. BRDF Models for Accurate and Efficient Rendering of Glossy Surfaces. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. 2012. Vol. 31, no. 1. P. 9:1-9:14.
34. Hery C., Villemin R. Physically Based Lighting at Pixar. *Graphics. Pixar*. URL: <https://graphics.pixar.com/library/PhysicallyBasedLighting/paper.pdf> (date of access: 21.07.2024).
35. Guy R., Agopian M. Physically Based Rendering in Filament. *GitHub*. URL: <https://google.github.io/filament/Filament.md.html> (date of access: 21.07.2024).
36. Neubelt D., Pettineo M. Crafting a Next-Gen Material Pipeline for The Order: 1886. *Self Shadow*. URL: [https://blog.selfshadow.com/publications/s2013-shading-course/rad/s2013\\_pbs\\_rad\\_notes.pdf](https://blog.selfshadow.com/publications/s2013-shading-course/rad/s2013_pbs_rad_notes.pdf) (date of access: 21.07.2024).
37. Brady A., Lawrence J., Peers P., Weimer W. genBRDF: discovering new analytic BRDFs with genetic programming. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. 2014. Vol. 33, no. 4. P. 114:1-114:11.
38. Jakob W., Hašan M., Yan L.-Q., Lawrence J., Ramamoorthi R., Marschner S. Discrete stochastic microfac. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. 2014. Vol. 33, no. 4. P. 115:1-115:10.
39. Lagarde S., de Rousiers C. Moving Frostbite to Physically Based Rendering 3.0. *SebLagarde.WordPress*. URL: [https://seblagarde.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/07/course\\_notes\\_moving\\_frostbite\\_to\\_pbr\\_v32.pdf](https://seblagarde.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/07/course_notes_moving_frostbite_to_pbr_v32.pdf) (date of access: 21.07.2024).
40. Heitz E. Understanding the Masking-Shadowing Function in Microfacet-Based BRDFs. *Journal of Computer Graphics Techniques*. 2014. Vol. 3, no. 2. P. 48-107.
41. Hammon E. PBR Diffuse Lighting for GGX + Smith Microsurfaces. *ubm-twideo01\_s3.amazonaws*. URL: [https://ubm-twideo01.s3.amazonaws.com/o1/vault/gdc2017/Presentations/Hammon\\_Earl\\_PBR\\_Diffuse\\_Lighting.pdf](https://ubm-twideo01.s3.amazonaws.com/o1/vault/gdc2017/Presentations/Hammon_Earl_PBR_Diffuse_Lighting.pdf) (date of access: 21.07.2024).
42. Wang K., Zhu J.-P., Liu H. Hou X. Model of bidirectional reflectance distribution function for metallic surfaces. *Chin. Phys. B*. 2016. Vol. 25, no. 9. P. 094201:1-094201:5.
43. Kulla C., Conty A. Revisiting Physically Based Shading at Imageworks. *SelfShadow*. URL: [https://blog.selfshadow.com/publications/s2017-shading-course/imageworks/s2017\\_pbs\\_imageworks\\_slides\\_v2.pdf](https://blog.selfshadow.com/publications/s2017-shading-course/imageworks/s2017_pbs_imageworks_slides_v2.pdf) (date of access: 21.07.2024).
44. Lagarde S., Golubev E. The Road Toward Unified Rendering with Unity's High Definition Render Pipeline. *Advances.RealTimeRendering*. URL: [https://advances.realtimerendering.com/s2018/Siggraph%202018%20HDRP%20talk\\_with%20notes.pdf](https://advances.realtimerendering.com/s2018/Siggraph%202018%20HDRP%20talk_with%20notes.pdf) (date of access: 21.07.2024).
45. Conty A., Kulla C. Production Friendly Microfacet Sheen BRDF. *SelfShadow*. URL: [https://blog.selfshadow.com/publications/s2017-shading-course/imageworks/s2017\\_pbs\\_imageworks\\_sheen.pdf](https://blog.selfshadow.com/publications/s2017-shading-course/imageworks/s2017_pbs_imageworks_sheen.pdf) (date of access: 21.07.2024).
46. Завальнюк Є. К., Романюк О. Н., Романюк О. В., Денисюк А. В., Котлик С. В. Аналіз нових моделей відбивної здатності поверхні для задач комп'ютерної графіки. *Матеріали конференції «Комп'ютерні ігри та мультимедіа як інноваційний підхід до комунікації – 2022»*, м. Одеса, 29 – 30 вересня. 2022 р. Одеса, 2022. С. 115-117.
47. Kondo Y., Ono T., Hirasawa Y., Murayama J. Accurate Polarimetric BRDF for Real Polarization Scene Rendering. *ECCV 2020*, Glasgow, Scotland, 23-28 August 2020 / ed. by A. Vedaldi, H. Bischof, T. Brox, J.-M. Frahm. 2020.
48. 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: 21.07.2024).

**Калічак Юрій Львович**  
Кандидат педагогічних наук, доцент  
ORCID: 0000-0003-4348-1740

Наукове видання



Колектив авторів



**Україна та світ:  
сучасні парадигми  
розвитку суспільства**

Колективна монографія



Видання українською та англійською мовами

**ISBN 978-617-7886-52-4**

**DOI: 10.61718/mon**

Опубліковано на основі ліцензії Creative Commons Attribution License.



Формат 60x90 1/8

Гарнітура «Times New Roman»

Авторські аркуші – 14,5.



Видавець СГ НТМ «Новий курс»

Пр. Перемоги, 77, оф. 179, Харків, 61174, Україна

Тел.: +380962250903, +380500301905

Telegram, Viber: +380970440309

Сайт: [www.newroute.org.ua](http://www.newroute.org.ua)

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до  
Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів  
видавничої продукції ДК № 8013 від 22.11.2023  
Зареєстровано у Global Register of Publishers. Ідентифікатор видавця 7886.