



УДК 004.92

# АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ОСВІТЛЕННЯ ФОНГА ТА БЛІНА ДЛЯ ЗАДАЧ РЕНДЕРИНГУ

## ANALYSIS OF PHONG AND BLIN LIGHTING MODELS FOR RENDERING TASKS

Романюк О.Н.<sup>1</sup>, Котлик С.В.<sup>2</sup>  
Romanyuk O.N.<sup>1</sup>, Kotlyk S.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine

<sup>2</sup>Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна

<sup>2</sup>Odessa National University of Technology, Odessa, Ukraine

<sup>2</sup>Одеський національний технологічний університет, Одеса, Україна

ORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-2245-3364>; <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0001-5365-1200>

E-mail: <sup>1</sup>rom8591@gmail.com, <sup>2</sup>sergknet@gmail.com

Copyright © 2026 by author and the journal “Automation of technological and business – processes”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI: 10.15673/atbp.v18i2.3490

**Анотація.** Розглянуто особливості використання моделей Фонга та Бліна при формуванні тривимірних графічних сцен у сучасних системах комп'ютерної графіки. Встановлено, що одним із трудомістких етапів процесу рендерингу є зафарбовування поверхонь, яке базується на використанні функції двонапрявленого розподілу відбиття світла BRDF, яка визначає характер взаємодії світлового потоку з поверхнею та безпосередньо впливає на реалістичність синтезованого зображення. Обґрунтовано необхідність порівняння моделей освітлення Фонга та Бліна, які є найбільш поширеними апроксимаціями дзеркальної складової BRDF у задачах візуалізації тривимірних сцен.

Проаналізовано основні етапи графічного конвеєра, що включають геометричні перетворення, триангуляцію поверхонь, растеризацію, інтерполяцію параметрів та обчислення освітлення. Показано, що подання складних поверхонь у вигляді полігональної сітки з трикутників забезпечує ефективну обчислювальну обробку та дозволяє реалізувати швидкий рендеринг у системах реального часу. Розглянуто використання базових векторів нормалі до поверхні, напрямку на джерело світла та напрямку на спостерігача, які формують математичну основу моделей освітлення. Наведено особливості застосування закону косинусів Ламберта для визначення дифузної складової відбиття.

Виконано порівняльний аналіз моделей Фонга та Бліна. Показано, що модель Фонга використовує вектор дзеркального відбиття, тоді як модель Бліна ґрунтується на використанні напіввектора між напрямками світла та спостерігача. Такий підхід дозволяє спростити обчислення та підвищити продуктивність рендерингу. Отримано аналітичний взаємозв'язок між параметрами моделей, який визначає умови формування однакової спекулярної складової кольору. Встановлено, що для більшості значень кутів співвідношення степеневих коефіцієнтів моделей наближається до чотирьох, однак при великих кутах виникають помітні відмінності у формі та розподілі відблисків. Проведений аналіз дозволяє оцінити переваги та недоліки кожної моделі залежно від вимог до швидкодії та фотореалістичності зображення. Отримані результати можуть бути використані для адаптивного вибору моделей освітлення в інтерактивних графічних системах, ігрових рушіях та системах візуалізації реального часу.

**Abstract.** The features of using the Fong and Blin models in the formation of three-dimensional graphic scenes in modern computer graphics systems are considered. It is established that one of the laborious stages of the rendering process is the painting of surfaces, which is based on the use of the bidirectional reflectance distribution function BRDF, which determines the nature of the interaction of the light flux with the surface and directly affects the realism of the synthesized image. The need to compare the Fong and Blin lighting models, which are the most common approximations of the specular component of BRDF in the tasks of visualization of three-dimensional scenes, is justified. The main stages of the graphics pipeline are analyzed, including geometric transformations, surface triangulation, rasterization, parameter interpolation and lighting calculations. It is shown that the representation of complex surfaces in the form of a polygonal mesh of triangles provides efficient computational processing and allows for fast rendering in real-time systems. The use of the basic vectors of the surface normal, the direction to the light source and the direction to the



observer, which form the mathematical basis of lighting models, is considered. The features of the application of Lambert's law of cosines to determine the diffuse component of reflection are presented. A comparative analysis of the Fong and Blin models is performed. It is shown that the Fong model uses the specular reflection vector, while the Blin model is based on the use of a half-vector between the directions of light and the observer. This approach simplifies calculations and increases rendering performance. An analytical relationship between the parameters of the models is obtained, which determines the conditions for the formation of the same specular color component. It is established that for most angle values, the ratio of the power coefficients of the models approaches four, however, at large angles, noticeable differences in the shape and distribution of glare occur. The analysis allows us to assess the advantages and disadvantages of each model depending on the requirements for speed and photorealism of the image. The results obtained can be used for adaptive selection of lighting models in interactive graphics systems, game engines, and real-time visualization systems.

**Keywords:** lighting models, BRDF, Phong model, Blin model, three-dimensional graphics, painting, surface lighting, specular reflection, rendering, graphics pipeline, visualization.

**Ключові слова:** моделі освітлення, BRDF, модель Фонга, модель Бліна, тривимірна графіка, зафарбовування, освітлення поверхонь, дзеркальне відбиття, рендеринг, графічний конвеєр, візуалізація.

### Вступ

У задачах зафарбовування тривимірних зображень важливу роль відіграє модель відбиття світла від поверхні, яка визначається функцією BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) [1-7]. Саме BRDF описує, як падаюче світло перетворюється у відбите залежно від напрямків освітлення та спостереження, що безпосередньо впливає на реалістичність візуалізації. Серед класичних підходів до апроксимації BRDF найбільш поширеними є моделі Фонга та Бліна [1-5], які історично стали базою для розвитку реального часу рендерингу.

Необхідність їх порівняння обумовлена тим, що обидві моделі мають різні математичні формулювання наближення дзеркальної складової BRDF, що призводить до різної якості відтворення бликів і різного рівня обчислювальної складності. Модель Фонга використовує відбитий вектор і спостереження, тоді як модель Бліна замінює його на напіввектор [1, 7] між напрямком світла та погляду, що суттєво спрощує обчислення та підвищує стабільність результатів. У практичних задачах комп'ютерної графіки це означає різну поведінку при зміні геометрії, роздільної здатності та положення камери, а також різну чутливість до артефактів інтерполяції нормалей.

Порівняння моделей Фонга та Бліна є необхідним для обґрунтованого вибору алгоритму зафарбовування залежно від вимог до продуктивності та фотореалістичності. Воно дозволяє встановити баланс між якістю візуалізації та швидкодією, що є критично важливим для інтерактивних систем, ігрових рушіїв і систем реального часу.

### Аналіз літературних джерел

Процес зафарбовування [1] тривимірних об'єктів є складним багатоетапним процесом, що реалізується в графічному конвеєрі та включає послідовність перетворень геометрії, обчислення освітлення та формування кінцевого кольору пікселів. Спочатку виконується геометрична обробка моделі, під час якої вершини полігональної сітки [2, 3] перетворюються з локальної системи координат у світову та далі у систему координат спостерігача. Після цього відбувається етап растеризації, на якому кожен трикутник розбивається на набір фрагментів, для яких інтерполюються необхідні параметри, зокрема нормалі, координати та вектори напрямків.

Наступним етапом є обчислення освітлення [5-9], де для кожного фрагмента враховуються вектори напрямку до джерела світла, до спостерігача та нормаль поверхні. На цьому етапі застосовуються моделі відбиття, які дозволяють апроксимувати дифузну та дзеркальну складові освітлення [6-9]. Далі виконується змішування результатів освітлення з текстурними даними, тест глибини та операції прозорості, що забезпечують правильне накладання об'єктів у сцені.

Завершальним етапом є запис отриманого кольору у буфер кадру, після чого формується фінальне зображення [1]. Таким чином, зафарбовування є не ізольованою операцією, а комплексним процесом, що інтегрує геометричні, оптичні та обчислювальні аспекти рендерингу.

У тривимірній графіці для представлення складних поверхонь використовується триангуляція - подання об'єкту у вигляді набору трикутників (рис. 1). Такий підхід забезпечує уніфіковане математичне подання довільної геометрії, що спрощує подальші етапи обчислювальної обробки. Використання трикутників є обчислювально ефективним, оскільки вони завжди є компланарними та мають прості інтерполяційні властивості для вершинних атрибутів. Це дозволяє графічним конвеєрам [1-3] здійснювати швидкий та стабільний рендеринг складних сцен у реальному часі.

У подальшому кожен трикутник полігональної сітки обробляється та зафарбовується незалежно від інших, що дозволяє локалізувати обчислення освітлення для кожної примітивної площини. Такий підхід забезпечує коректне врахування нормалей, інтерполяції параметрів поверхні та значно спрощує реалізацію алгоритмів рендерингу в конвеєрі растеризації.

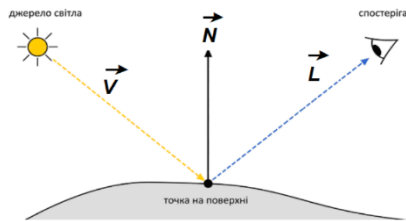
При зафарбовуванні [1-9] тривимірних об'єктів у графічному конвеєрі використовують набір базових векторів, які визначають взаємодію світла з поверхнею та положення спостерігача. Насамперед це вектор нормалі до поверхні, який задає орієнтацію елементарного трикутника в просторі та є базовим для обчислення дифузної та дзеркальної складових освітлення. Також використовується вектор напрямку на джерело світла  $\vec{L}$ , що



визначає, під яким кутом світловий потік падає на поверхню, і безпосередньо впливає на інтенсивність освітлення. Не менш важливим є вектор  $\vec{V}$  напрямку на спостерігача (камеру), який використовується для визначення видимості та розрахунку дзеркального відбиття в моделях на основі BRDF. Сукупність цих векторів формує математичну основу процесу зафарбовування та визначає кінцевий колір кожної точки поверхні.



**Рис. 1 - Подання чайника Юта полігональною моделлю**  
**Fig. 1 – Utah Teapot represented as a polygonal model**

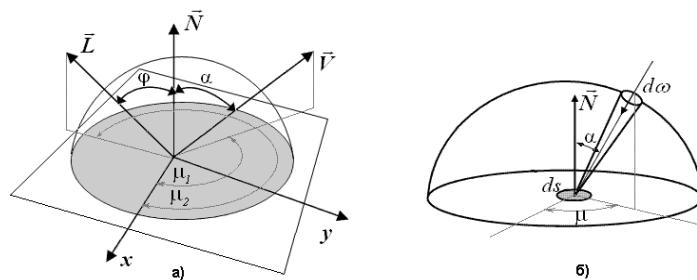


**Рис. 2 - Вектори до точки поверхні**  
**Fig. 2 – Vectors directed to a point on the surface**

Інтенсивність випромінювання  $I$  у конкретному напрямку можна розглядати як величину променевого потоку, що проходить через елементарну площадку  $ds_{\perp}$ , яка орієнтована перпендикулярно до напрямку поширення променя (див. рис. 2).

Цей потік визначається в межах диференціально малого тілесного кута  $d\omega$ , який геометрично відповідає площі нескінченно малого елемента на поверхні одиничної сфери [1-3].

$$I = \frac{d\Phi}{ds_{\perp} d\omega} = \frac{d\Phi}{ds \cos \alpha d\omega}.$$



**Рис. 3 - Вихідні дані для розрахунку BRDF**  
**Fig. 3 – Input data for calculation BRDF**

BRDF може бути розрахована за формулою [2]

$$BRDF = dI(\vec{V}_i) / I(L_i) \cos \alpha_i d\omega_i.$$

При наявності в сцені точкового джерела світла [1] інтенсивність дифузного відбиття пропорційна косинусу кута між нормаллю до поверхні й напрямком на джерело світла  $\vec{L}$ .

У цьому випадку для обчислення інтенсивності дифузного відбиття застосовують закон косинусів Ламберта [1-9]

$$I_d = I_o \cdot k_d \cdot \cos \varphi,$$

де  $I_o$  – інтенсивність джерела світла,  $k_d \in [0, 1]$  – коефіцієнт дифузного відбиття,  $\varphi$  – кут між вектором

У тривимірній графіці широкого поширення отримала модель відбиття Б. Фонга [1], що визначається за формулою



У ДФВЗ Фонга [2]  $\cos\psi = \vec{V} \cdot \vec{R}$ , де  $\vec{R} = 2 \cdot (\vec{L} \cdot \vec{N}) \cdot \vec{N} - \vec{L}$ . Вектор  $\vec{R}$  називають вектором дзеркального відбиття [1]. У дистрибутивній функції Бліна [1-3], яка історично з'явилася пізніше ДФВЗ Фонга, замість  $\cos\psi$  використовують  $\cos\gamma = \vec{N} \cdot \vec{H}$ , де  $\vec{H} = (\vec{L} + \vec{V}) / |\vec{L} + \vec{V}|$ . Уважалося, що при використанні ДФВЗ Бліна та Фонга отримують візуально ідентичні зображення [3].

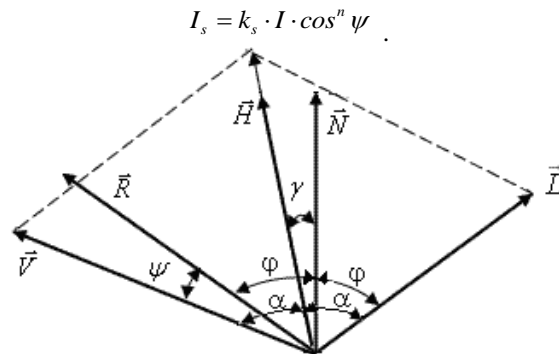


Рис. 4 - Вектори нормалей до точки поверхні

Fig. 4 – Surface normal vectors at a point

Моделі освітлення Фонга та Бліна–Фонга широко використовуються у програмних продуктах комп'ютерної графіки, системах тривимірного моделювання, ігрових рушіях та CAD-системах. Їх популярність пояснюється невисокою обчислювальною складністю, можливістю апаратного прискорення та достатньо високою якістю формування дзеркальних відблисків у режимі реального часу.

У системах тривимірного моделювання та анімації, таких як Autodesk Maya, Blender, 3ds Max та Cinema 4D, моделі Фонга та Бліна–Фонга застосовуються для попереднього перегляду матеріалів у viewport-візуалізації. Вони дозволяють швидко оцінити форму об'єкта, характер блиску поверхні та взаємодію джерел світла зі сценою без використання ресурсомісткого трасування променів.

У графічних API та бібліотеках реального часу, зокрема OpenGL і DirectX, модель Фонга тривалий час була базовим стандартом локального освітлення. У фіксованих графічних конвеєрах ранніх версій OpenGL саме модель Бліна–Фонга використовувалась апаратно для розрахунку дзеркальної складової освітлення. Більшість сучасних shader-програм також реалізують модифіковані варіанти цих моделей.

У сучасних ігрових рушіях, таких як Unity, Unreal Engine та Godot, моделі Бліна–Фонга використовуються у стандартних shader-матеріалах для мобільних платформ, VR-систем та сцен реального часу. Хоча новітні рушії активно переходять до PBR (Physically Based Rendering), моделі Фонга і Бліна залишаються важливими через їхню швидкість та простоту реалізації.

У CAD- та інженерних системах, зокрема SolidWorks, AutoCAD і CATIA, ці моделі використовуються для інтерактивного відображення тривимірних деталей та поверхонь під час проектування. Вони забезпечують достатній рівень реалістичності при мінімальному навантаженні на графічну підсистему.

Окрім моделей Фонга та Бліна–Фонга, у комп'ютерній графіці використовують низку інших моделей зафарбовування та відбиття світла, зокрема ламбертову модель, модель Гуро, Oren–Nayar, Cook–Torrance, а також анізотропні моделі типу Ward і Ashikhmin–Shirley [2, 3]. Ламбертова модель [1] є найпростішою і описує лише дифузне розсіювання світла без врахування дзеркальних відблисків, тому часто використовується як базовий компонент складніших схем освітлення. Модель Гуро ґрунтується на обчисленні освітлення у вершинах із подальшою інтерполяцією по поверхні полігону, що забезпечує високу швидкість, але призводить до втрати точності у відтворенні бликів. Модель Oren–Nayar [2-3] розширює ламбертову, враховуючи шорсткість поверхні, що дозволяє реалістичніше моделювати матеріали типу тканин або штукатурки, однак збільшує обчислювальну складність. Модель Cook–Torrance належить до фізично обґрунтованих BRDF-моделей і враховує мікрофасетну структуру поверхні, ефекти Френеля та геометричне затінення, що забезпечує високу реалістичність, але потребує значних обчислювальних ресурсів. Анізотропні моделі Ward та Ashikhmin–Shirley застосовуються для матеріалів із напрямленими відблисками, наприклад металів або шовку, і також характеризуються підвищеною складністю обчислень. Усі зазначені моделі, за винятком найпростіших, є обчислювально витратними, оскільки базуються на складних фізичних або напівфізичних розрахунках, включно з інтегральними BRDF-виразами, нормалізацією векторів та обчисленням додаткових оптичних ефектів. Саме через це вони обмежено використовуються у високопродуктивних системах реального часу, таких як ігрові рушії, де перевага надається спрощеним або апроксимованим моделям освітлення, наприклад Blinn та Phong або комбінованим підходам із оптимізацією через апаратне прискорення.

Проблема полягає у необхідності обґрунтованого вибору між моделями освітлення Фонга та Бліна–Фонга в задачах комп'ютерної графіки, оскільки вони, маючи різні математичні підходи до апроксимації дзеркальної складової BRDF, забезпечують різний рівень фотореалістичності та обчислювальної складності, що безпосередньо впливає на якість і продуктивність рендерингу в системах реального часу.

Мета статті полягає у порівняльному аналізі моделей освітлення Фонга та Бліна–Фонга для визначення



відмінностей їх математичної побудови, обчислювальної складності та ефективності застосування в системах комп'ютерної графіки реального часу.

### Порівняльний аналіз дистрибутивних функцій освітлення Фонга та Бліна

Дистрибутивні функції освітлення Бліна та Фонга є сьогодні найпоширенішими в системах комп'ютерної графіки. Проаналізуємо дистрибутивну функцію Бліна та Фонга. Розглянемо компланарний випадок, коли вектори  $\vec{L}$ ,  $\vec{V}$ ,  $\vec{R}$  знаходяться в одній площині.

Оскільки діагональ ромба є бісектрисою його кута, то кути між векторами  $(\vec{V}, \vec{H})$ ,  $(\vec{L}, \vec{H})$  збігаються. Відомо з оптики, що кути між вектором нормалі до поверхні та векторами падаючого й відбитого світла рівні. З рис. 4 видно, що  $\psi = 2\alpha - 2\varphi$ . Значення кута  $\varphi$  дорівнює  $\alpha - \gamma$ , тому  $\psi = 2\alpha - 2(\alpha - \gamma) = 2\gamma$ . Оскільки рівні кути, то рівні і їх косинуси, тому  $\cos \psi = \cos 2\gamma$ . Запишемо останнє рівняння у вигляді  $\cos \psi = 2 \cos^2 \gamma - 1$ .

Будемо вважати, що за моделлю Бліна та Фонга формуються ідентичні зображення. Тоді  $(\cos \gamma)^n = (\cos \psi)^p$ . З урахуванням попереднього виразу можна записати, що  $(\cos \gamma)^n = (2 \cos^2 \gamma - 1)^p$ . Отримуємо, що

$n \cdot \ln(\cos \gamma) = p \cdot \ln(2 \cos^2 \gamma - 1)$ . Звідси  $\frac{n}{p} = \frac{\ln(2 \cos^2 \gamma - 1)}{\ln(\cos \gamma)}$ . Крива  $\frac{n}{p} = \frac{\ln(2 \cos^2 \gamma - 1)}{\ln(\cos \gamma)}$  має вертикальну

асимптоту. Для її знаходження прирівняємо до нуля значення  $2 \cos^2 \gamma - 1$ . Це має місце при  $\gamma = \pi/4$ . На проміжку від нуля до  $\gamma = \pi/4$  знаменник  $\ln(\cos \gamma)$  монотонно спадає до значення  $-0,347$ . Аналогічно можна

показати, що  $\frac{n}{p} = \frac{\ln(\cos \psi)}{\ln \left| \sqrt{\frac{\cos \psi + 1}{2}} \right|}$ .

На рис. 5 зображено графік залежності  $\frac{n}{p}$  від  $\psi$ .

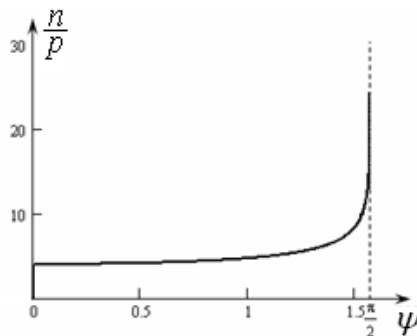


Рис. 5 - Графік залежності  $n/p$  від кута  $\psi$

Fig. 5 – Graph of  $n/p$  dependence on the angle  $\psi$



а)

б)

Рис. 6 - Форми відблисків на випуклих поверхнях:

а) модель Бліна

б) модель Фонга

Fig. 6 – Specular highlight shapes on convex surfaces:

а) Blinn-Phong model; б) Phong model

Із графіка 5 видно, що для більшості значень  $\psi$  відношення степенів, при яких має місце однакове значення спекулярної складової кольору, дорівнює 4. При  $\psi \rightarrow \pi/2$  ця закономірність порушується, що обумовлює візуальну відмінність між зображеннями (рис. 6, 7).



а) б)  
**Рис. 7 - Форми відблисків на плоскій поверхні:**  
 а) модель Бліна б) модель Фонга  
**Fig. 7 – Specular highlight shapes on a flat surface:**  
 а) Blinn-Phong model; б) Phong model

Знайдемо взаємозв'язок між векторами  $\vec{L}, \vec{V}, \vec{N}$ . Сформуємо матрицю  $(\vec{L} \ \vec{N} \ \vec{V})$  з компонент векторів. Її транспонована матриця має такий вигляд:  $\begin{pmatrix} \vec{L} \\ \vec{N} \\ \vec{V} \end{pmatrix}$ . Знайдемо визначник добутку вихідної матриці та її

транспонованої. При цьому будемо враховувати, що  $\vec{L}^2 = \vec{N}^2 = \vec{V}^2 = 1$ , оскільки за умовою вихідні вектори

$$\begin{pmatrix} \vec{L} \\ \vec{N} \\ \vec{V} \end{pmatrix} \cdot (\vec{L} \ \vec{N} \ \vec{V}) = \begin{pmatrix} (\vec{L})^2 & \vec{L} \cdot \vec{N} & \vec{L} \cdot \vec{V} \\ \vec{L} \cdot \vec{N} & \vec{N}^2 & \vec{N} \cdot \vec{V} \\ \vec{L} \cdot \vec{V} & \vec{N} \cdot \vec{V} & \vec{V}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \vec{L} \cdot \vec{N} & \vec{L} \cdot \vec{V} \\ \vec{L} \cdot \vec{N} & 1 & \vec{N} \cdot \vec{V} \\ \vec{L} \cdot \vec{V} & \vec{N} \cdot \vec{V} & 1 \end{pmatrix}$$

нормалізовано.

$$\text{Знайдемо визначник} \begin{vmatrix} 1 & \vec{L} \cdot \vec{N} & \vec{L} \cdot \vec{V} \\ \vec{L} \cdot \vec{N} & 1 & \vec{N} \cdot \vec{V} \\ \vec{L} \cdot \vec{V} & \vec{N} \cdot \vec{V} & 1 \end{vmatrix} = 1 - (\vec{N} \cdot \vec{V})^2 - (\vec{L} \cdot \vec{N})^2 - (\vec{L} \cdot \vec{V})^2 + 2(\vec{L} \cdot \vec{N}) \cdot (\vec{N} \cdot \vec{V}) \cdot (\vec{L} \cdot \vec{V})$$

Знайдемо визначник

$$\text{Визначник} \begin{vmatrix} L_x & L_y & L_z \\ N_x & N_y & N_z \\ V_x & V_y & V_z \end{vmatrix} = \begin{pmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} \text{ є мішаним добутком [2] трьох векторів.}$$

З лінійної алгебри відомо, що  $\begin{pmatrix} \vec{L} \\ \vec{N} \\ \vec{V} \end{pmatrix} \cdot (\vec{L} \ \vec{N} \ \vec{V}) = \begin{vmatrix} L_x & L_y & L_z \\ N_x & N_y & N_z \\ V_x & V_y & V_z \end{vmatrix}$ . З урахуванням останньої властивості можна

$$\text{записати} \quad 1 - (\vec{N} \cdot \vec{V})^2 - (\vec{L} \cdot \vec{N})^2 - (\vec{L} \cdot \vec{V})^2 + 2(\vec{L} \cdot \vec{N}) \cdot (\vec{N} \cdot \vec{V}) \cdot (\vec{L} \cdot \vec{V}) = (\vec{L} \times \vec{N} \cdot \vec{V})^2$$

Отримане рівняння встановлює взаємозв'язок між векторами нормалі до поверхні, вектором спостерігача та вектором джерела світла.

Обчислювальна складність моделей Фонга та Бліна визначається кількістю арифметичних операцій, необхідних для обчислення освітлення кожного фрагмента поверхні під час рендерингу тривимірної сцени. У моделі Фонга для кожного пікселя необхідно визначити вектор дзеркального відбиття світла відносно нормалі поверхні, після чого виконуються обчислення кута між цим вектором і напрямком на спостерігача. Такий підхід забезпечує достатньо точне формування дзеркальних відблисків, однак потребує значної кількості арифметичних операцій. Для одного фрагмента необхідно виконати скалярні добутки, множення, віднімання, нормалізацію векторів та операцію піднесення до степеня, яка є однією з найбільш затратних у shader-обчисленнях. У середньому реалізація моделі Фонга потребує приблизно 35–45 арифметичних операцій на один піксель без урахування текстурних звернень і доступу до пам'яті.

У моделі Бліна процедура обчислення дзеркальної складової є спрощеною. Замість вектора відбиття використовується серединний вектор  $\vec{H} = (\vec{L} + \vec{V}) / |\vec{L} + \vec{V}|$ , сформований між напрямком на джерело світла та напрямком на спостерігача. Такий підхід дозволяє уникнути частини складних векторних операцій і зменшує кількість обчислень. Для одного фрагмента модель Бліна–Фонга потребує приблизно 25–30 арифметичних операцій. Таким чином, її обчислювальна складність приблизно на 20–35 % менша порівняно з моделлю Фонга.

Різниця між моделями особливо помітна у сценах із великою кількістю полігонів. Наприклад, при рендерингу сцени з одним мільйоном полігонів модель Фонга може забезпечувати швидкодню на рівні близько 38–42 кадрів за секунду, тоді як модель Бліна–близько 50–60 кадрів за секунду за однакових умов тестування. При збільшенні



кількості джерел світла обчислювальне навантаження додатково зростає, оскільки для кожного джерела необхідно окремо обчислювати дзеркальну складову освітлення. У такому випадку перевага моделі Бліна стає ще більш помітною.

Важливу роль відіграють і особливості апаратної реалізації. У сучасних графічних процесорах операції нормалізації та скалярних добутків оптимізовані на апаратному рівні, однак обчислення вектора відбиття, характерне для моделі Фонга, все одно потребує більшої кількості внутрішніх інструкцій. Саме тому модель Фонга тривалий час використовувалась як базова модель освітлення в OpenGL, DirectX та більшості ігрових рушіїв реального часу.

Слід також зазначити, що обидві моделі мають значно меншу обчислювальну складність порівняно з сучасними фізично коректними моделями освітлення [9], такими як Cook-Torrance або GGX [2, 3], які потребують додаткових розрахунків функцій Френеля, геометричних коефіцієнтів затінення та статистичних розподілів мікрофасетів. Саме тому моделі Фонга та Бліна залишаються актуальними для систем, де критично важливими є швидкість та ефективність використання обчислювальних ресурсів.

Було проведено комп'ютерне тестування моделей Фонга та Бліна (рис. 8) з метою оцінювання їх обчислювальної складності залежно від кількості полігонів у тривимірній сцені. Для проведення експерименту використовувалась тестова сцена з поступовим збільшенням полігональності моделей від 1 тис. до 1 млн полігонів. Рендеринг здійснювався у роздільній здатності 1920×1080 із використанням одного точкового джерела освітлення та однакових параметрів матеріалів для обох моделей зафарбовування. У процесі тестування визначався середній час формування одного кадру, який обчислювався як середнє значення для 100 послідовно сформованих кадрів. Експерименти проводились на графічному процесорі NVIDIA RTX 3060 із використанням попиксельного освітлення та однакових параметрів шейдерної програми. Для забезпечення коректності порівняння усі інші параметри сцени, включаючи положення камери, джерела світла та текстурні дані, залишались незмінними. Отримані результати показали (рис.8), що зі збільшенням кількості полігонів час рендерингу зростає для обох моделей, однак модель Бліна демонструє меншу обчислювальну складність завдяки спрощеному обчисленню дзеркальної складової освітлення через використання half-vector замість вектора відбиття. Найбільша різниця спостерігалася при обробці сцен із високою полігональністю, де перевага моделі Бліна за швидкістю становила близько 40–45%. зі збільшенням кількості полігонів для обох моделей. Модель Бліна демонструє меншу обчислювальну складність у всьому діапазоні. При 1000000 полігонів різниця у часі становить близько 40-45% на користь моделі Бліна.

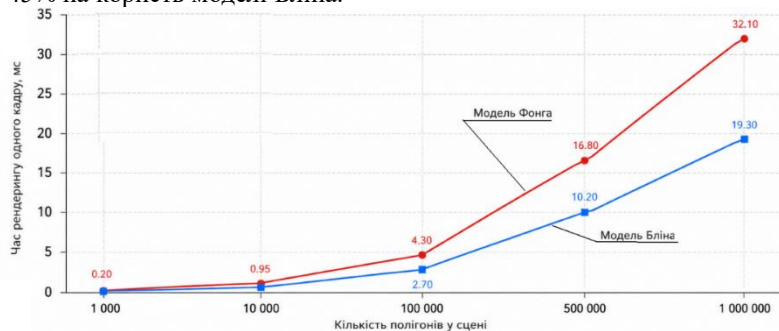


Рис. 8 – Час рендерингу одного кадру з використанням моделей Фонга та Бліна

Fig. 8 – Rendering time per frame using Phong and Blinn-Phong models

#### Рекомендації по вибору моделей освітлення

Вибір моделей Фонга та Бліна при реалізації систем тривимірної графіки повинен здійснюватися з урахуванням вимог до якості візуалізації, продуктивності обчислень, типу сцени та апаратних ресурсів. Обидві моделі належать до класичних моделей локального освітлення та широко використовуються у комп'ютерній графіці для формування дзеркальної складової відбиття світла. Незважаючи на подібність принципів побудови, вони мають різну обчислювальну складність і різний рівень ефективності при роботі у високопродуктивних графічних системах.

Модель Фонга доцільно використовувати у випадках, коли основною вимогою є підвищена якість формування дзеркальних відблисків і плавність зміни освітлення поверхні. Завдяки використанню вектора відбиття модель забезпечує достатньо точне відтворення світлових ефектів, особливо для гладких та полірованих поверхонь. Такий підхід дозволяє отримати реалістичні блики та більш природний розподіл інтенсивності світла. Модель Фонга рекомендується застосовувати у системах, де швидкість не є критичним фактором, наприклад у науковій візуалізації, системах автоматизованого проектування, офлайн-рендерингу. Крім того, модель Фонга є доцільною у випадках, коли необхідно виконати детальний аналіз впливу параметрів освітлення на якість зображення.

Разом із тим модель Фонга характеризується підвищеною обчислювальною складністю, оскільки потребує додаткових операцій обчислення та нормалізації вектора відбиття для кожного фрагмента поверхні. При збільшенні кількості полігонів або джерел світла це призводить до суттєвого зростання часу рендерингу. Тому використання цієї моделі у високопродуктивних системах реального часу може негативно впливати на швидкість графічного застосування.



Модель Бліна є оптимізованим варіантом моделі Фонга та рекомендується для використання у системах інтерактивної тривимірної графіки, комп'ютерних іграх, симуляторах і віртуальних середовищах реального часу. Основною перевагою цієї моделі є використання серединного вектора замість вектора відбиття, що дозволяє зменшити кількість арифметичних операцій при обчисленні дзеркальної складової освітлення. Завдяки цьому забезпечується менше навантаження на графічний процесор та підвищується продуктивність системи при збереженні достатньо високої якості зображення. Особливо ефективною модель Бліна для сцен із великою кількістю полігонів, де різниця у швидкодії порівняно з моделлю Фонга може становити десятки відсотків.

З практичної точки зору модель Бліна–Фонга рекомендується використовувати у випадках, коли необхідно забезпечити баланс між швидкістю рендерингу та візуальною якістю. Вона добре масштабується при збільшенні складності сцени та дозволяє підтримувати стабільну частоту кадрів навіть при використанні великої кількості джерел освітлення. Саме тому ця модель тривалий час була базовим стандартом у більшості графічних API та ігрових рушіїв.

Таким чином, модель Фонга доцільно застосовувати у задачах, орієнтованих на підвищену точність освітлення та якість візуалізації, тоді як модель Бліна–Фонга є більш придатною для високопродуктивних систем реального часу, де критичне значення має ефективність використання обчислювальних ресурсів.

### Висновки

У результаті проведених досліджень виконано порівняльний аналіз моделей освітлення Фонга та Бліна–Фонга, які є одними з найпоширеніших апроксимацій функції двонапрявленого розподілу відбиття світла BRDF у системах тривимірної графіки. Проаналізовано особливості формування дифузної та дзеркальної складових освітлення, а також досліджено математичні основи побудови обох моделей. Показано, що модель Фонга базується на використанні вектора дзеркального відбиття, що забезпечує достатньо високу якість формування відблисків та плавний розподіл освітлення на поверхні об'єкта. Разом із тим така модель потребує значної кількості арифметичних операцій, що призводить до збільшення обчислювальної складності при попиксельному зафарбовуванні.

Проведене тестування показало, що модель Бліна–Фонга забезпечує вищу продуктивність рендерингу, особливо при збільшенні кількості полігонів у сцені. При високій полігональності перевага моделі Бліна–Фонга за швидкодією може становити близько 40–45 %, що є важливим для систем реального часу, ігрових рушіїв та інтерактивних графічних застосунків.

У роботі також встановлено взаємозв'язок між параметрами моделей Фонга та Бліна, що дозволяє оцінити умови формування подібних спекулярних відблисків.

Показано, що при великих кутах спостерігаються помітні відмінності у формі та розподілі бликів в моделях Фонга та Бліна. Отримані результати підтверджують доцільність адаптивного вибору моделей освітлення залежно від вимог до фотореалістичності та продуктивності системи. Модель Фонга рекомендується використовувати у задачах, де пріоритетом є якість візуалізації, тоді як модель Бліна–Фонга є більш ефективною для високопродуктивних систем комп'ютерної графіки реального часу.

### Список використаних джерел

1. Романюк О. Н., Романюк О. В., Чехмєструк Р. Ю. Комп'ютерна графіка : електронний навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2023. 147 с. Електронний ресурс.
2. Akenine-Möller T., Haines E., Hoffman N. Real-Time Rendering. 4th ed. Boca Raton : CRC Press, 2018. 1045 p.
3. Pharr M., Jakob W., Humphreys G. Physically Based Rendering: From Theory to Implementation. 4th ed. Cambridge : MIT Press, 2023. 1200 p.
4. Romanyuk O. N., Zavalniuk Y. K., Chekhmestruk R. Y. et al. Combined Bidirectional Reflectance Distribution Functions Usage for Increasing Images Creation Productivity // Applied Aspects of Information Technology. 2023. Vol. 6, No. 2. P. 130–138. DOI: 10.15276/aait.06.2023.9.
5. Romanyuk O. N., Zavalniuk Y. K., Romanyuk O. V. et al. New Illumination Model for Rendering // Proc. 15th Int. Conf. Advanced Computer Information Technologies (ACIT). Šibenik, 2025. P. 723–727. DOI: 10.1109/ACIT65614.2025.11185657.
6. Romanyuk O. N., Snigur A. V., Koval L. G., Zavalniuk Y. K. Approximation of the distribution function of surface reflectivity by a third-degree polynomial // Optoelectronic Information-Power Technologies. 2023. DOI: 10.15276/aait.06.2023.9.
7. Romanyuk O. N., Zavalniuk Y. K., Romanyuk O. V., Kotlyk S. V. Modifications of the Phong method for 3D image rendering problems // Information Technologies and Automation: Proc. Int. Conf. 2025.
8. Romanyuk O., Zavalniuk Y., Pavlov S. et al. New surface reflectance model with the combination of two cubic functions usage // Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska. 2023. Vol. 13, No. 3. P. 101–106. DOI: 10.35784/iapgos.5327.
9. Завальнюк Є., Романюк О., Павлов С. та ін. Розробка фізично коректної моделі відбиття другого степеня // Оптоелектронні інформаційно-енергетичні технології. 2023. Вип. 44, № 2. С. 19–25. DOI: 10.31649/1681-7893-2022-44-2-19-25.

Отримана в редакції 25.03.2026. Прийнята до друку 09.04.2026. Розміщено в інтернеті 31 травня 2026.

Received 25 March 2026. Approved 09 April 2026. Available in Internet 31 May 2026