

**Список літератури**

1. В.К. Смирнов, Вальцовка заготовок под штамповку. М.: Машиностроение, 1964.
2. І.В. Севостьянов, Ю.В. Добрянук, та І.А. Бубновська "Розвиток процесів вальцювання криволинійних заготовок із алюмінієвих сплавів" Вісник машинобудування та транспорту. ВНТУ, №2 (6), с. 150 – 157, 2017.
3. В.А. Матвійчук, та І.А. Бубновська, "Розвиток процесів холодного вальцювання криволинійних заготовок із алюмінієвих сплавів", на VII Міжнародної науково-технічної конф. Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів

тиском і якості фахової освіти, Київ – Херсон, 2016, с. 26-29.

4. В.А. Матвійчук, В.М. Михалевич, Ю.В. Добрянук, та І.А. Бубновська "Спосіб визначення пластичності металів вальцюванням циліндричних зразків на клин" Патент на корисну модель №109984, Верес.26, 2016.

5. М.А. Рвачёв, и В.Д. Покрас "Применение метода R-функций для экспериментально-расчётного исследования напряженного состояния и деформированности в осесимметричных процессах ОМД", Изв. вузов. Чёрная металлургия. №11, с. 59-60, 1991.

**ВИБІР ГРАФІЧНОГО ПРОЦЕСОРУ ДЛЯ СИСТЕМ КОМП'ЮТЕРНОЇ ГРАФІКИ***Денисюк В.О.*

*Вінницький національний аграрний університет  
доцент кафедри комп'ютерних наук  
та економічної кібернетики, к.т.н., доцент*

**ELECTING OF TRAVELING SALESMAN PROBLEM CRITERIA***Denysiuk V.*

*Vinnytsya National Agrarian University  
Associate Professor of Computer Sciences  
and Economic Cybernetics Department, Ph.D., Associate Professor*

**Анотація**

Стаття присвячена питанням дослідження етапів графічного конвеєру, особливостям обирання графічного процесору для різноманітних систем комп'ютерної графіки, розгляду інформаційно-апаратного критерія ефективності процесору для графічної системи.

**Abstract**

The article is sanctified to the questions of research of the graphics conveyer stages, to the features of electing graphic processor for the various systems of computer graphics, consideration of informatively-apparatus criterion efficiency of the graphic system processor.

**Ключові слова:** графічний процесор, комп'ютерна графіка, програмне забезпечення, апаратне забезпечення, графічний конвеєр, відображення графічної інформації, піксель, тексель, критерій ефективності.

**Keywords:** graphic processor, computer graphics, software, hardware, graphic conveyer, reflection of graphic information, pixel, texel, criterion of efficiency.

**Мета статті.** Важливим питанням є дослідження етапів графічного конвеєру, питання обирання графічного процесору для систем комп'ютерної графіки, розгляд інформаційно-апаратного критерія ефективності процесору для графічної системи.

**Аналіз сучасного стану задач комп'ютерної графіки.**

**Етапи графічного конвеєру.** Розглянемо особливості основних етапів графічного конвеєру з точки зору вибору оптимальних програмних засобів апаратних спеціалізованих пристроїв машинної графіки відтворення складних картин і сцен для кожного із етапів графічного конвеєру.

Важливим завданням комп'ютерної графіки є інформаційне обслуговування життєдіяльності людини, що виражається в широкому застосуванні у різноманітних галузях науково-практичної діяльності людини графічної інформації та використанню засобів відображення графічної інформації, які є невід'ємною частиною різних обчислювальних комплексів, систем і мереж.

Різнманітні системи відображення графічної інформації – це складна сукупність інтерактивних технічних і програмних засобів для подання інформації у графічній формі [5,6,8,9, 16-18, 27]. Інтерактивні системи при побудові графічних сцен дотримуються певної послідовності дій, які складають графічний конвеєр. Метою дослідження є визначення основних показників графічного конвеєру по перетворенню об'єктів, що описуються у тривимірному просторі в матрицю комірок відеопам'яті растрового дисплея - у растрове зображення [6, 12, 20]. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю вибору оптимальних програмних засобів та апаратних спеціалізованих пристроїв машинної графіки для відтворення складних картин і сцен на кожному етапі графічного конвеєру.

**Особливості графічного конвеєру.** Сучасні інтерактивні графічні системи при побудові об'ємних сцен дотримуються певної послідовності дій, які в сукупності складають графічний тривимірний (3D) конвеєр. Групу операцій графічного конвеєра (ГК), що виконують відокремлені проміжні дії прийнято

називати стадією або етапом графічного конвеєра. За виконання кожного з етапів відповідає своя підсистема: підсистема опису сцен у 3D-просторі, геометрична підсистема, що об'єднує теселяцію геометричних моделей, афінні перетворення, видові перетворення та вибір моделі освітлення, підсистема рендерингу, яка містить у собі процеси видалення невидимих поверхонь, накладання текстур, зафарбовування та фінальне опрацювання сцени, підсистема кадрового буфера та підсистема візуалізації, що відповідають за кінцеве відображення об'ємної сцени на екрані [6, 9, 20].

Концептуально ГК необхідно розглядати, як деяку узагальнену модель виведення 3D графічної інформації [6, 18]. Виділяють такі основні етапи ГК: опис 3D зображення, геометричні перетворення та рендеринг [6, 9, 16, 20].

На етапі опису зображення визначають стан усіх складових об'єктів, їх взаємне розташування та подальша стратегія дій над об'єктами. Відбувається відсікання по об'єму реальних об'єктів з світової системи координат (ССК) та отримання усіченої світової системи координат (УССК). Із реальних об'єктів у ССК отримуємо їх моделі. Моделі реальних об'єктів розглядаємо в УССК, які є зменшеними за множиною параметрів та властивостей у порівнянні з об'єктами ССК, але такими, що задовільняють вимогам та цілям задач їх використання. Обидві координатні системи (ССК та УССК) мають однакові розмірності та орієнтацію. У випадку моделювання 3D графічних об'єктів це – довжина, висота, глибина (X,Y,Z), які вимірюються у метрах (км, дм, см тощо) [5, 6, 9, 16, 20, 26].

На етапі геометричних перетворень у якості вхідних використовуються об'єкти УССК. На цьому етапі в залежності від області використання моделі, тобто точки зору на графічні об'єкти (центру проєкції) відбувається проєкція об'єктів на відповідні площини проєкції – виконується видова операція. Над об'єктами проводиться декомпозиція, теселяція геометричних моделей, виконуються афінні та видові перетворення, визначається тип моделі освітлення тощо. Отримані дані використовуються для побудови об'єктів у нормованій координатній системі (НКС), яка, у загальному випадку, орієнтується на засоби подальшого використання моделі та має відносну розмірність не більше одиниці по кожній із координат. У випадку графічного нормування мова іде про зменшення вимірів до двох – довжина та висота (X та Y), - для представлення інформації за допомогою традиційних засобів виведення графічної інформації, які мають плоску, двовимірну (2D), область виведення. Спосіб машинної організації НСК може бути довільним – лінійним, двовимірним, тривимірним, асоціативним і т.ін. [6, 20, 26].

На етапі кінцевої візуалізації (рендерингу) за даними про зображення, отриманими на етапі нормування, виконуються різноманітні геометричні перетворення, формуються видимі пікселі зо-

браження, для яких визначаються екранні координати та кінцева інтенсивність кольору у координатному просторі пристроя відображення [20, 26]. Розмірність координат пристроїв відображення на тепер не перевищує сотень мм, а у деяких випадках - одиниць м [8, 15].

Розглянемо етапи виведення 3D графічної інформації більш детально. Сам принцип конвеєрної обробки 3D-зображень є технологічним стандартом [26, 31]. За конвеєрним принципом працюють усі 3D програмні інтерфейси і графічні акселератори [1, 5, 9, 12, 18, 19, 31].

При описі зображення використовується триангуляція зображення. При триангуляції зображення розбивається на трикутники, оскільки:

1) трикутник є найпростішим полігоном, вершини якого однозначно задають площину;

2) будь-яку область можна гарантовано розбити на трикутники;

3) обчислювальна складність алгоритмів розбиття на трикутники набагато менша, ніж при використанні інших полігонів;

4) для трикутника легко визначити трьох його найближчих сусідів, які мають із ним спільні грані [9, 19, 20].

Триангуляція залежить від об'єктів обробки. Якщо об'єкти обробки багатокутники (піраміда, призма тощо), то необхідно поділити їх грані на трикутники. Якщо об'єкти обробки криволінійні поверхні, то застосовуються складніші алгоритми, наприклад, метод Делоне, або спочатку об'єкт розбивається на багатокутники (виконується теселяція), а потім вже на трикутники. Для сучасних задач машинної графіки загальна кількість пікселів може досягати млрд. на один кадр [6, 36].

Всі операції рендерингу (кінцевої візуалізації) виконуються за багатокроковим механізмом - конвеєром рендерингу. Однією з основних та найбільш трудомістких процедур рендерингу є процедура зафарбовування, згідно з якою для кожної точки поверхні визначається інтенсивність кольору та екранні координати, що вимагає високої колірної здатності до 24 колірних площин (в окремих випадках до 48) [14, 16, 27, 36]. Спочатку при зафарбовуванні обирається модель освітлення, яка визначає взаємодію об'єкта зі світлом, яке на нього падає. При цьому враховується розташування джерела світла, його тип, оптичні властивості матеріалу поверхні об'єкту. За оптичні характеристики об'єкта відповідає двофакторна дистрибутивна функція (BRDF) кількох змінних, які характеризують властивості матеріалу, з якого виготовлено об'єкт [19, 20].

Під час трансформації перетворюються координати об'єктів, до них застосовуються матриці трансформації. Перед наступним етапом можна реалізувати поверхшинне освітлення, коли кожна вершина отримує значення освітлення, а потім вони інтерполюються по поверхні полігону. Також на цьому етапі присутні вершинні шейдери, які дозволяють деформувати чи викривляти об'єкти при зміні координат вершин. Трансформація вигляду полягає у тому, що координати об'єктів, що займали місця в системі ко-

ординат сцени транслюються в координати, що прив'язані до віртуальної камери (центр проєкції), це робиться для спрощення наступного підкроку - трансформації проєкції. На цьому кроці відбувається проєкція 3D-об'єктів у 2D-площину. Те, що видно на цій площині, є результатом зйомки віртуальної камери. Для того, щоб на вхід наступних етапів конвеєра не поступала зайва інформація (об'єкти та їх фрагменти, які не потрапляють у поле видимості камери) застосовуються методи відсікання невидимих частин. Однак ця задача достатньо складна [20, 26]. Для відсікання використовується об'єм відсікання (clipping volume) - шістьма площинами за трьома координатами обмежується область сцени, яка гарантовано буде помітна на екрані. Потім застосовується backface culling - відкидання задніх граней (отримуємо об'єкт в УССК) [5]. У кожного полігона окрім координат вершин є важлива характеристика - нормаль. Це вектор, який лежить на перпендикулярі, що виходить із геометричного центра трикутника. У кожного полігона є дві сторони - лицьова і зворотна. Нормаль вказує його орієнтацію [5, 9, 16, 20, 26].

При rasterизації 3D-зображення, спроектоване на площину, перетворюється у растровий формат, тобто визначаються значення результуючих пікселів [16, 20]. На етапі обробки окремим пікселям надаються значення кольору, що були отримані інтерполяцією кольорів вершин, або вони замінюються чи до них додається колір текстури. Тут може діяти піксельний шейдер, який визначеним чином комбінує колір, глибину і позицію пікселя з текстурами або за спеціальними алгоритмами. Після проходження усіх стадій конвеєра зображення заноситься у буфер кадру, який має передній і задній шари. В задньому - новий кадр, в передньому - поточний. Коли приходить час наступного рендеринга, вміст цих шарів міняється місцями (swap), у результаті на екрані новий кадр, а старий надсилається у задній буфер, де замінюється наступним, щойно прорахованим [20,26].

У процесі рендеринга виконується етап накладання текстур, що робить віртуальний світ реалістичним. Текстура - це двовимірний бітова картка (картинка), яка накладається на полігон і зображує фактуру його поверхні [20, 26]. Те, що не можна змодельовати полігонами, можна намалювати, причому, якщо на поверхні, яку ми моделюємо текстурою, немає виразних чи неоднорідних деталей, вона буде виглядати реалістично. Якщо звичайне зображення складається із пікселів, то текстура складається із текселів (texel - texture element, - текстурний елемент) Текстура накладається строго за координатами. При роботі з текстурами виникає немало проблем, тому задача формулюється наступним чином: як визначити колір конкретного пікселя на екрані, якщо в сцені на нього приходиться менше або більше текселів. Раніше дану задачу вирішували з методом Point Sampling. Від кожного пікселя на екрані опускається промінь вглиб сцени. Тексель, що найближчий до цього променя і накладається на екран. При цьому обов'язково виникають помилки. Якщо текселів на кожен піксел забагато, то частина інформації просто втрачається, якщо ж на піксель менше одного текселя (об'єкт близько до

камери - центру проєкції), пробіли замінюються неіснуючими пік селами [16, 20, 26]. Такий метод сучасного користувача не влаштовує, тому використовують методи білінійної фільтрації (Bi-linear Filtering), їх суть полягає в тому, що колір пікселя отримується у результаті інтерполяції (усереднення) кольорів чотирьох сусідніх текселів. Якщо об'єкт розміщено далеко від камери, його текстура майже не спотворюється. А коли об'єкт недалеко від камери і текселів не вистачає, інтерполяція створює розпливчасте зображення цієї області. Але білінійна фільтрація добре працює лише для полігонів, які паралельні або майже паралельні екрану, тому що чотири сусідніх текселів, які беруться для інтерполяції, - це майже коло. Якщо площина нахилиється, коло перетворюється у еліпс, але інтерполюються текселі по колу. Від цього постійно накопичуються невеликі помилки, які після визначеного кута нахилу стають помітними, текстура фільтрується геометрично невірною, а користувач спостерігає сильні спотворення. Для визначення кольору одного пікселя потрібно зчитувати кольори чотирьох текселів, що збільшує навантаження на шину пам'яті. Тому, білінійну фільтрацію використовують досить рідко. Якщо користувач на екрані бачить текстуру значно далі або ближче, ніж передбачував розробник, то текстура досить сильно спотворюється фільтрацією, що стає помітним через появу "завад" зображення. Це можна вирішити за допомогою мipmapingu (MIP Mapping). Multum in Parvo (MIP) з латини - "багато в одному", - її сутність полягає у тому, що для однієї і тієї ж поверхні розробник створює декілька копій текстури із різним ступенем деталізації. Кожна наступна версія текстури більша або менша за попередню у 4 рази. Ця версія текстури називається мipmap-рівнем, а усі мipmap-рівні разом складають мipmap-каскад. Коли камера віддаляється від текстури, вона змінюється на мipmap-рівень з меншою роздільною здатністю, а коли наближається - з більшою. Переваги даної технології - це те, що незалежно від того, на якій відстані знаходиться спостерігач від об'єкта, текстура відображується без геометричних спотворень, а далеко розміщені текстури не забирають багато ресурсів акселератора. Недоліки - доводиться зберігати кілька копій однієї і тієї ж текстури, а переходи між мipmap-рівнями відбуваються досить різко [9, 26].

Сучасний 3D-конвеєр використовує у своїй роботі технологію шейдерів [1, 5, 9, 19, 27]. Шейдер - це програма одного з етапів ГК, що використовується у 3D-графіці для визначення кінцевих параметрів об'єкта чи зображення. Розрізняють вершинний, піксельний та потоковий шейдери. Вершинний шейдер оперує даними вершин полігону. До таких даних відносять координати вершини в просторі, текстурні координати, вектор бінормалі, вектор нормалі. Вершинний шейдер може бути використаний для видового чи перспективного перетворення вершин, генерації текстурних координат, розрахунку освітленості. Більшість графічних акселераторів (GeForce 9800GTX, Radeon HD 3870 X2) містять блок розрахунку трансформації і освітлення, що виконує фіксовані операції: встановлення параметрів рендерингу освітлення, текстур, матричні перетворення [14]. В

графічному прискорювачі Radeon 8800 присутні 128 потокових процесорів (streaming processor), які є уніфікованими – можуть обробляти як піксельні, так і вершинні шейдери [19]. Технологія піксельних шейдерів дозволяє успішно вирішувати проблему змішування декількох текстур, у тому числі карт відображення, тінювих карт (освітлення), об'ємних текстур тощо. Тільки з появою піксельних шейдерів з'явилися текстури, що реалістично імітують воду і хмари [9]. Ускладнення та розширення функцій GPU вимагає орієнтування на 256-розрядну чи 512-розрядну архітектуру в арифметиці із плаваючою крапкою з використанням паралельних структур на базі використання кристалів від 700 млн. до 1,5 млрд. транзисторів, як правило за 55-90 нм технологією [5, 8, 12, 14, 18, 19, 34, 36].

В специфікації API DirectX намітилася тенденція зменшення кількості можливих станів ядра GPU за рахунок більшої уніфікації (у порівнянні з попередніми - DX8 SM1.X, DX9 SM2, DX9 SM3, DX10, DX10.1, DX11) [19, 31]. Найбільш важливі операції, які можна виконувати апаратними засобами графічного процесора (DirectX 10), такі: міжкадрова інтерполяція вершин (Key Frame Interpolation), що суттєво прискорює анімацію; накладання вершин (Vertex Blending) з використанням більш ніж чотирьох матриць перетворення, що полегшує “скелетну анімацію” складних моделей без їх розбиття на декілька частин; процедурна геометрія (викривлення властивостей вершин параметричним об'єктом, наприклад, хвилі на водній поверхні); складні моделі освітлення, що враховують властивості матеріалу об'єктів (ray tracing). Технологія вершинних шейдерів є значним кроком вперед до фотореалістичної графіки. Вершинні шейдери рідко використовуються самостійно, у більшості операцій вони тісно пов'язані з піксельними шейдерами. Піксельний шейдер працює з пікселями зображення, кожному пікселю поставлений у відповідність деякий набір атрибутів, таких як колір, глибина, текстурні координати. Піксельний шейдер використовується на останньому етапі графічного конвеєра для формування видимих пікселів зображення. Одним із найбільш потужних нововведень API DirectX є геометричні шейдери (geometry shader, GS) в тому числі нова шейдерна модель Shader Model 5.0. Їх поява пов'язана із тим, що вершинні шейдери не здатні працювати із даними про зв'язки окремих вершин об'єкта, над яким працюють, тобто про геометричну топологію об'єкта, також вони не можуть втручатися в дані зв'язки, додавати і видаляти вершини [9, 31]. На відміну від них, геометричні шейдери працюють уже із цілими примітивами (точка, лінія, трикутник, патч) і їх зв'язками із сусідніми примітивами, але головне те, що вони можуть безпосередньо ними керувати, генеруючи на виході нові примітиви у будь-якій кількості або пропускаючи непотрібні, в залежності від вхідних даних і свого алгоритму. Також у стандартний графічний конвеєр API DirectX додано три нові стадії (DirectX 11): Hull Shader, Tessellator та Domain Shader. Зміни торкнуться і піксельного шейдера, що дозволить включити так звані обчислювальні шей-

дери (Compute Shader), які працюватимуть на загальні комп'ютерні застосування. Також в DirectX 11 додано деякі нові формати стиснення текстури, які забезпечуватимуть кращу якість зображення і підтримуватимуть великий динамічний діапазон (ми розглянемо їх докладніше трохи пізніше) і маса невеликих функцій, більшості з яких не буде потрібно нове обладнання. Серед таких функцій - підтримка подвійної точності чисел з плаваючою комою (опціональна можливість, призначена для обчислювальних шейдерів), збільшення обмежень текстур до 16К і збільшення верхнього ліміту ресурсу до 2Гб [30, 32].

Такі широкі можливості в обробці геометричних об'єктів дозволяють перенести на графічний процесор (GPU) виконання багатьох операцій, які раніше виконувалися частково під керуванням центрального процесора (CPU), що знижувало швидкість паралельної роботи процесора і відео-картки за рахунок частих блокувань 3D-ресурсів для виконання операцій над ними на CPU. Наприклад, можливо повністю перенести на GPU розрахунок тінювих об'ємів для певних алгоритмів динамічних тіней, реалізувати якісне сумісне перетворення об'єктів (displacement mapping) та деякі прогресивні техніки розмитості зображення (motion blur), візуальні ефекти (хутро, волосся, рослинність), однопрохідне створення кубічних карт (cubemap) [9, 26, 30-32].

**Вимоги до відображення графічної інформації.** Використання графічної інформації набуло широкого застосування у різних галузях науково-практичної діяльності людини. Досить актуальною є задача вибору засобів комп'ютерної графіки, а саме пристроїв відображення графічної інформації, які забезпечують необхідну якість та швидкість формування графічних зображень без збільшення апаратних витрат з достатньою достовірністю відтворення графічної інформації.

Пристрої відображення графічної інформації (ПВГІ) - це сукупність технічних і програмних засобів для подання у зручній для сприйняття оператором формі сигналів про стан об'єкта, впливу на нього і способів керування ним [6, 7]. У загальному контурі функціонування ПВГІ обов'язкова присутність людини-оператора, це пов'язано із призначенням ПВГІ в цілому та й особливостями процесів інтерактивного людино-машинного діалогу [7, 18]. Надійна й ефективна робота оператора можлива тоді, коли він одержує від ПВГІ достатню кількість інформації для ухвалення рішення. Під пристроєм відображення графічної інформації розуміється пов'язаний з основною ЕОМ обчислювальний пристрій з підключеними до нього, як технічними засобами візуалізації, так і іншими зовнішніми пристроями [6, 7, 18]. Актуальність дослідження обумовлена стрімким розвитком виробництва пристроїв відображення графічної інформації та акселераторів для відтворення складних картин та сцен, в яких широко використовуються різноманітні високопродуктивні алгоритми відтворення елементів зображень.

Розглянемо вимоги до пристроїв відображення графічної інформації з погляду людино-машинного інтерфейсу. Оператор будь-якої обчислювальної системи працює з певними інформаційними моделями, що представляються на індикаторі ПВГІ [7]. Обчислювальні системи обслуговують великі потоки інформації, тому з метою розвантаження каналів зв'язку і економії пам'яті обчислювальної системи використовується стиснення інформації з наступним відновленням на основі різноманітних інтерполяційних алгоритмів, реалізацію яких виконують спеціалізовані цифрові пристрої. Тенденції розвитку ПВГІ і обчислювальної техніки визначають зростання частки графічної інформації та її значне ускладнення при відображенні. Оскільки важливою ланкою обчислювального комплексу є людина, то найбільш наочну і у той же час насичену по обсягу інформацію можна представити, використовуючи можливості тривимірної (3D) комп'ютерної графіки [6, 7, 17, 18].

Сам процес відтворення інформації є по суті процесом моделювання реального об'єкту [7]. Таке моделювання описується концептуальною моделлю виводу 3D графічної інформації [6]. Якщо за реальний об'єкт узяти довільну систему у світових координатах, то завдання відсікання по об'єму, видової операції та операції нормування виконуються обчислювальним комплексом поза ПВГІ. Завдання остаточного відсікання і виводу інформації на пристрій відображення виконується у ПВГІ. При виводі двовимірної (2D) графічної інформації завдання спрощується до задання вікна в 2D світовому координатному просторі та задання поля виводу на двовимірній нормованій видовій поверхні [5-7, 9, 17, 18].

Існує чотири основних типи графічних моделей, пов'язаних з особливостями реальних об'єктів, їх призначенням та природою [6, 17, 18]:

- 1) двовимірна модель (площинна, 2D);
- 2) каркасна модель ("дротова", 3D);
- 3) поверхнева модель (3D);
- 4) об'ємна модель (модель суцільного тіла, 3D).

Використання 2D моделей є найпростішим випадком у порівнянні з використанням 3D моделей. Сам процес 2D моделювання полягає у відтворенні певних функціональних залежностей по вузловим точкам (базовим відлікам та ін.). Питання про вибір методу візуалізації результатів вимірів вирішується разом з вибором методів кодування і дискретизації на етапі проектування ПВГІ [17,18]. Складність 3D моделей полягає в тому, що поверхня відображення існуючих індикаторних пристроїв не має графічного третього виміру [6, 7]. Невідповідність між просторовими об'єктами та плоскими зображеннями усувається шляхом введення проєкцій, які відображають тривимірні об'єкти на двовимірній проєкційній картинній площині [7].

Каркасна модель хоча й тривимірна, але має мало можливостей. У ній картина об'єкту, що моделюється, представлена ребрами по геометричним координатам вершин. Найчастіше каркасна модель використовується як проміжний етап в одержанні поверхневої моделі [5-7, 9, 18].

Поверхнева модель представляє процеси або об'єкти, які моделюються поверхнями, має максимальну наочність [7]. У якості поверхонь використовуються параметричні кубічні поверхні (параметричні сплайни) [5, 7]. Поверхневі моделі вимагають найбільших обсягів обчислень із усіх чотирьох типів моделей. Звичайно при використанні поверхневих моделей відбувається декомпозиція сплайнів на полігони (трикутники) до або у процесі відображення [7, 18].

Об'ємна модель формується об'єднанням, перетинанням, накладанням простих об'ємних примітивів, таких як сфери, куби, циліндри та ін. Найбільшу популярність об'ємне моделювання одержало в машинобудуванні [6, 18].

Таким чином, у зв'язку з особливостями того або іншого ПВГІ та його застосуванням можна рекомендувати одну із вищенаведених моделей. Найбільш прийнятними для пристроїв відображення графічної інформації, що орієнтовані на максимальну швидкодію, є площинна 2D і поверхнева 3D моделі, як моделі з максимальною наочністю [6, 7]. Крім того, процес побудови усіх моделей здійснюється шляхом аналізу, а потім синтезу зображення, що виражається в розбитті зображення на елементарні складові частини (примітиви) з наступною декомпозицією їх в остаточному зображенні.

ПВГІ використовуються при рішенні багатьох задач [3-7, 9, 17, 18]:

- відображення динамічних ситуацій у реальному масштабі часу при керуванні технологічними процесами, військовими об'єктами;
- відображення результатів та ходу наукових досліджень і експериментів;
- автоматизація проектування технологічних процесів, програмного забезпечення, архітектури, дизайну, проектування великих інтегральних схем, розрахунку топології друкованих плат та ін.;
- статистична обробка даних (побудова гістограм, використання плавних кривих та ін.);
- обробка топографічної й картографічної інформації в геоінформаційних системах, зображень штучних супутників Землі для вивчення земної поверхні,
- обробки ділової, управлінської економічної графічної інформації (кругові, стовпчикові та інші діаграми);
- обробка біомедичних зображень (комп'ютерна томографія);
- моделювання реальних об'єктів в архітектурі, різних тренажерах та імітаторах (віртуальна реальність);
- завдання користувача людино-машинного інтерфейсу (меню, піктограми та ін.);
- комп'ютерне кіно, анімація, реклама, ігри (мистецтва).

Кожне із застосувань накладає свої вимоги на функціональні параметри пристрою відображення графічної інформації за: роздільною здатністю дискретного координатного простору відображення (ДКПВ); колірною роздільною здатністю; набору

примітивів, які використовуються; точністю відтворення зображень за кольором та формою; швидкістю побудови зображень. У процесі синтезу ПВГІ вирішується питання про прийнятний компроміс між вищенаведеними параметрами та витратами на їх реалізацію (програмними і апаратними), що в остаточному підсумку визначає функціональні параметри, реальної системи, яка створюється, та її варіативність.

Розглянемо діапазони функціональних параметрів пристроїв відображення графічної інформації. Органи зору людини (при 100% гостроті зору) здатні розрізняти чорну крапку діаметром 0.1 мм на білому фоні з відстані 20-30 см від очей і дві сусідні смужки з відтінками, довжини хвиль яких відрізняються на  $10 \text{ \AA}$  (при 100% кольоровому зорі). Щоб без втрати інформації відобразити об'єкти реального світу, необхідно мати дискретний координатний простір відображення, який відповідає реальному зображенню, у межах  $4096 \times 6144$  пікселів (більше 24 млн. пікселів на зображення) і кольорову роздільну здатність у 256 градацій яскравості по кожній із трьох складових кольору R,G,B (усього  $16.777.216 \approx 17$  млн. кольорів, по 8 двійкових розрядів на кожну складову кольору). Для задач активної 3D графіки необхідно мати ДКПВ до 165 Гпікселів ( $\approx 256K \times 640K$ ) та до 48 розрядів на складові кольору [7,18].

Мінімальна частота, з якою повинна змінюватися динамічна картинка на екрані, щоб не виникав ефект дискретності руху, становить 24-25 кадрів за секунду, а для деяких випадків в ігрових імітаторах - 30 або навіть 60 кадрів за секунду [5-7, 9, 18].

Якщо говорити про точність відтворення контурів і кольорів графічних зображень, то з погляду реальних завдань головним є одержання візуально-прийнятних результатів [6, 17]. Більше того, існує ряд методів, які розмивають контури та кольори контурів об'єктів з метою згладжування сходинкового ефекту [6, 18]. Існуючі ж методи та способи колірної розфарбування зображень по своїй суті є емпіричними і не відповідають закону збереження енергії, тобто також обираються (найчастіше в інтерактивному режимі) із міркувань прийнятності результатів. Лінійні та кругові примітиви, тобто примітиви кривих не вище другого порядку, покривають практично всі завдання побудови зображень [6, 17]. Якість картини на пристрої відображення, залежить від: розмірів поля виводу пристроя відображення, як у дискретному координатному просторі відображення, так і у фізичних одиницях виміру; розміру пікселя; відстані між пікселями; з якої відстані відбувається спостереження за пристроєм відображення (звичайно не менше, ніж 20÷30 см) [7, 18].

У існуючих та перспективних кольорових пристроїв відображення розміри ДКПВ перебувають у межах від  $960 \times 540$  пікселів до  $2560 \times 1600$  пікселів з діагоналлю екрана від 17" до 30 (від 43 см до 76 см) [7], також цікаві технології "цифрового дому" з використанням плазмових панелей до 150" (приблизно 3,81 м) з розмірністю ДКПВ  $4096 \times 2160$ . Діаметр пікселя становить величину від 0,28 мм до

0,26 мм. Відстань між пікселями становить величину від 0,26 мм до 0,31 мм. Отже, показники існуючих і перспективних пристроїв відображення по наведеним параметрам не досягають меж, які здатні розрізняти людський зір, але дають прийнятні результати відображення [7, 18].

Для відображення машинобудівної деталі середньої складності необхідно близько 10.000 полігонів, кожний по 100 пікселів. Таким чином, достатньо мати екран розміром  $1280 \times 1024$  пікселів [6]. У самому простому випадку зображення може бути монохромним.

Для кінематографа зображення об'єктів можуть складатися з більшого числа полігонів - від 15.000 до 75.000 [8], тобто для відображення необхідні екрани з дискретною роздільністю від  $1280 \times 1280$  пікселів до більш, ніж  $8192 \times 8192$  пікселів. Кількість кольорів може змінюватися в межах від 224 до 236, хоча достатньо і  $224 = 16.777.216$  кольорів по 8 двійкових розрядів на кожну зі складових кольору R, G, B [18].

Динамічні параметри по оживленню зображення можуть перебувати в межах від  $4 \div 10$  кадрів/с до 24 кадрів/с [7, 18].  $4 \div 10$  кадрів за секунду - нижня межа частоти зміни картини, що не викликає почуття дискомфорту у оператора ПВГІ, а 24 кадри за секунду - максимальна частота зміни картини, на яку реагують органи зору людини. А для засобів ігрових симуляцій актуальними є зміни картини у 30 кадрів/с, або навіть до 60 кадрів/с [6, 7, 18].

Проведемо оцінку вимог, до ПВГІ за часом побудови одного пікселя. Введемо позначення:

$N_x$  - роздільна здатність ПВГІ по горизонталі;

$N_y$  - роздільна здатність ПВГІ по вертикалі;

$F_d$  - динамічна частота зображення на екрані;

$K_e$  - коефіцієнт заповнення екрану;

$t_p$  - час обробки одного пікселя;

Необхідна продуктивність ПВГІ по побудові зображення становить:

$$P_o = N_x \cdot N_y \cdot F_d \cdot K_e \quad (1)$$

Реальна продуктивність ПВГІ може бути визначена за наступним співвідношенням

$$P_r = \frac{K_v}{t_p} \quad (2)$$

де  $K_v$  - коефіцієнт доступу до відеопам'яті за кадр, характеризує ступінь доступності відеопам'яті (як правило, для однопортової відеопам'яті  $K_v = 0,25 \div 0,35$ , для двопортової -  $K_v \approx 0,7$  [7, 18]).

Прирівнявши (1) і (2), одержуємо вираз для обчислення часу, необхідного для обробки одного пікселя (3):

$$t_p = \frac{K_v}{N_x \cdot N_y \cdot F_d \cdot K_e} \quad (3)$$

Аналіз (3) дозволяє визначити шляхи збільшення  $t_p$  з метою зменшення апаратних витрат і здешевлення систем ПВГІ:

1) зменшення роздільної здатності по горизонталі й вертикалі ( $N_x$  та  $N_y$ );

2) зменшення динамічної частоти зображення на екрані ( $F_d$ );

3) зменшення коефіцієнта заповнення екрана ( $K_e$ ) - зменшення розміру зображень;

4) збільшення часу доступу до відеопам'яті під час кадру з боку графічних акселераторів, що можливо досягти, наприклад, за рахунок використання багатопортової відеопам'яті.

$$t_p = \frac{K_v}{N_x \cdot N_y \cdot F_d \cdot K_e} = \frac{1}{165 \cdot 2^{30} \cdot 60 \cdot 1} = 9,4072987 \cdot 10^{-14} (c) \approx 94,1 (\phi c). \quad (4)$$

2) Для досягнення повної динаміки ( $F_d = 24$  кадри/с) у режимі реального часу в завданнях комп'ютерної анімації або кінематографії, за умови по-

$$t_p = \frac{K_v}{N_x \cdot N_y \cdot F_d \cdot K_e} = \frac{1}{2^{13} \cdot 2^{13} \cdot 24 \cdot 1} = 6,2088171 \cdot 10^{-10} (c) \approx 0,62 (нс). \quad (5)$$

3) Для завдань машинобудування без динаміки зображення ( $F_d = 1$ ,  $K_v = 1$  та  $K_e = 0,2$  у просторі  $1280 \times 1024$ ):

$$t_p = \frac{K_v}{N_x \cdot N_y \cdot F_d \cdot K_e} = \frac{1}{1280 \cdot 1024 \cdot 1 \cdot 0,2} = 3,814 \cdot 10^{-6} (c) \approx 3,81 (мкс). \quad (6)$$

**Інформаційно-апаратний критерій ефективності процесору графічної системи.** Комп'ютерна графіка вирішує складні та важливі задачі з інформаційного обслуговування науково-практичної діяльності людини. Для опрацювання додатків комп'ютерної графіки використовуються різноманітні графічні системи, як універсальні, так і спеціалізовані – професійні. Аби розвантажити центральні процесори графічних систем від невластивих комп'ютерній графіці операціям та збільшити загальну швидкодію графічних систем, використовуються спеціалізовані графічні акселератори, графічних процесорів, що виконані у вигляді окремих чи декількох інтегральних схем. Досить актуальною є задача ефективного вибору графічного процесору для відповідної графічної системи.

Графічні системи набули широкого застосування у різних галузях діяльності людини від складних імітаційних систем візуалізації різних комплексів (автомобільних, авіаційних, космічних тощо), систем відтворення складної графічної інформації у режимі реального часу (системи керування, військові комплекси тощо), або систем візуалізації задач економічного моделювання, до графічних акселераторів, що використовуються в нескладних побутових комп'ютерах. Досить актуальною є задача вибору засобів комп'ютерної графіки, а саме спеціалізованих графічних процесорів, які забезпечують необхідну якість та швидкодію формуванні графічних зображень без збільшення апаратних витрат з достатньою достовірністю відтворення графічної інформації. Актуальність дослідження обумовлена стрімким розвитком виробництва графічних процесорів у вигляді спеціалізованих інтегральних схем та обиранням необхідного за відповідними параметрами графічного процесору та вимогами кожної конкретної графічної системи.

Так, наприклад, розглянемо три варіанти обчислення значення  $t_p$  для різних задач.

1) Для перспективних задач активної 3D графіки ( $F_d = 60$  кадрів/с), з виконанням умови повної прозорості відеопам'яті ПВГІ ( $K_v = 1$ ), використання усього ДКПВ ( $165$  Гнікселів) для ПВГІ [4] ( $K_e = 1$ ):

вної прозорості відеопам'яті ПВГІ ( $K_v = 1$ ) і використання всього ДКПВ для ПВГІ ( $8192 \times 8192$ ) під зображення ( $K_e = 1$ ):

**Обирання критерію порівняння процесорів для графічної системи.** З метою порівняння графічних процесорів, у вигляді спеціалізованих інтегральних схем, (ГП) для графічної системи (ГС) необхідно обрати критерій порівняння, або критерій ефективності того чи іншого пристрою, за яким відбудеться порівняння [5, 8, 11, 13, 18, 25]. Для цього розглянемо параметри графічних процесорів. Сучасні ГП характеризуються такими основними параметрами:

- кількість потокових процесорів (шт.);
- частота ядра (МГц або ГГц);
- частота шейдерів (шейдерного домена) (МГц або ГГц);
- частота пам'яті (МГц або ГГц);
- об'єм пам'яті (адресне поле відеопам'яті) (МБ);
- інтерфейс пам'яті (ширина шини пам'яті) (біт);
- перепускна спроможність пам'яті (Гб/с);
- швидкість заповнення сцени текстурами (млрд/с);
- підтримка графічних стандартів (наприклад, API DirectX, OpenGL);
- можливість нарахування (наприклад, відповідність технології SLI);
- апаратні витрати (млн. трн.);
- технологія виробництва (нм);
- споживання електричної потужності (Вт);
- вартість придбання.

Параметр точності відтворення різноманітних функціональних залежностей у дискретному координатному просторі відображення (ДКПВ) не розглядається тому, що усі сучасні графічні процесори використовують алгоритми, які надають точність не гірше 0,5 дискрета [17, 18, 20, 2, 26, 35].

Існують різні методика оцінки ефективності, наприклад, вартість одного кадра ДКПВ за секунду [29]. Але така методика суттєво залежить від маркетингових обставин та особливостей ціноутворення на ГП.

При обиранні критерія ефективності необхідно враховувати те, що критерій ефективності не можна одержати засобами математики [13]. Одержання критерію є суто евристичною процедурою, яка виконується із урахуванням призначення та умов функціонування об'єкта оцінювання уцілому [6, 13]. На практиці поліпшення одного параметра нерідко супроводжується погіршенням принаймні одного іншого параметра, що вказує на необхідність використання комплексних критеріїв ефективності, що пов'язують у необхідних пропорціях найбільш важливі часткові показники [6, 11, 13, 25].

Найпоширеніший узагальнений критерій ефективності технічного пристрою має вигляд [11, 13, 25]:

$$Q_r = \frac{(\text{ефект})}{(\text{витрати})}. \quad (7)$$

Причому, недолік ефекту можна компенсувати зменшенням витрат [2, 6].

У зв'язку з вищенаведеним і з традиціями інформаційної техніки [2, 8, 11, 25], за критерій ефективності обирається інформаційно-апаратний критерій [13]:

$$Q_r = \frac{\bar{R}}{C}, \quad (8)$$

де  $\bar{R}$  - інформаційна продуктивність пристрою;

$C$  - апаратні витрати на реалізацію пристрою.

Інформаційна продуктивність пристрою визначається у зв'язку з перерахованими вище параметрами процесору і специфікою його застосування [8, 23, 26] за співвідношенням:

$$\bar{R} = P_s \cdot (N_d + N_c) \cdot K_f, \quad (9)$$

де  $P_s$  - продуктивність пристрою [пікселів за секунду];

$N_d$  - розрядність одного з вимірів ДКПВ [біт];

$N_c$  - розрядність однієї із трьох складових кольору (R, G, B) [біт];

$K_f$  - коефіцієнт складності графічних примітивів виведення у порівнянні зі складністю виводу відрізка прямої лінії двовимірним (2D) лінійним інтерполятором, що дорівнює "1".

Значення коефіцієнта  $K_f$  обирається відповідно до суб'єктивних оцінок складності операцій обробки, які виконуються, та відтворення інформації, прийнятими в машинній графіці [5, 6, 8, 18, 20, 21, 26] і реалізованими на даному пристрої. Причому, кожна додаткова функція машинної графіки, яку здійснює пристрій, або доповнення ДКПВ на один вимір збільшує  $K_f$  на "1". Наприклад, для пристрою, що відтворює 2D відрізки прямої лінії, він дорівнює 1; 3D відрізки прямої лінії - 2; незафарбовані тривимірні (3D) трикутники - 3; зафарбовані 3D трикутники або незафарбовані, але з можливістю їх афінних перетворень - 4; зафарбування 3D трикутників з можливістю виконання афінних перетворень даного трикутника - 5; відтворення 3D трикутника, його афінні перетворення, а також видалення невидимих ліній - 6; поверхонь - 7; для пристрою, який виконує усі перераховані вище функції та може бути запрограмованим - 8; для ГП, який виконує усі перераховані вище функції та може бути використаним у технології SLI - 9; 10 - максимальне значення параметру, яке враховує майбутнє розширення функцій ГП. Для більшості сучасних ГП значення  $K_f$  відповідає значенням {6, 7, 8, 9} [5, 7, 8, 18].

В якості апаратних витрат на реалізацію пристрою ( $C$ ) можливо обрати, або число еквівалентних вентилів з двома входами, або відповідне їм число транзисторів для пристроїв реалізованих у вигляді великих інтегральних схем (ВІС) або надвеликих інтегральних схем (НВІС), а для пристроїв на дискретних компонентах - число еквівалентних вентилів з двома входами [6, 8, 17, 18].

З урахуванням (3) вираз (2) приймає вигляд (4):

$$Q_r = \frac{P_s \cdot (N_d + N_c) \cdot K_f}{C}. \quad (10)$$

Зміст критерія  $Q_r$  (10) полягає в оцінці середньої продуктивності пристрою в пікселях за секунду, що припадає на один транзистор (вентиль) пристрою при побудові у ДКПВ, кожний з вимірів якого становить  $N_d$  біт, з кількістю біт на кожному зі складових кольору  $N_c$  і складністю виведених графічних примітивів  $K_f$ .

Далі орієнтуємося на одночасне збільшення параметра  $P_s$  і зменшення параметра  $C$ , тобто на досягнення максимально можливої швидкодії ГП при реалізації його з мінімально можливими апаратними витратами, з огляду на функціональні можливості ГП у відповідному ДКПВ.

Критерій (10) використовується для одержання узагальненого критерію ефективності, що дозволяє визначити відносний ступінь ефективності ГП, що порівнюються [11]:

$$E = \frac{Q_r}{Q_o}, \quad (11)$$

де  $Q_r$  - інформаційно-апаратний критерій ефективності (4) даного ГП;

$Q_o$  - узагальнена "потенційна" характеристика ідеального пристрою ГП за критерієм (10).

$Q_o$  відповідає задоволенню максимальних вимог по відтворенню графічної інформації у ДКПВ. Вираз для  $Q_o$  має вигляд [6, 8]:

$$Q_o = \frac{P_{s \max} \cdot (N_{d \max} + N_{c \max}) \cdot K_{f \max}}{C_{\min}}, \quad (12)$$



де:  $P_{s \max}$  - максимальна продуктивність пристрою, що відповідає найкращому випадку відтворення інформації у ДКПВ [8];

$N_{d \max}$  - максимальна розрядність одного із вимірів ДКПВ, що задовільняє поставленим завданням;

$N_{c \max}$  - максимальна розрядність однієї із трьох складових кольору, що задовільняє завданню;

$K_{f \max}$  - коефіцієнт максимальної складності виведених динамічних примітивів;

$C_{\min}$  - мінімальні апаратні витрати ідеалізованого пристрою, у [шт. транзисторів], який обирається із існуючих найбільш технологічних графічних ВІС (з метою досягнення необхідної динаміки зображення, величини ДКПВ та колірної роздільної спроможності; кількість кристалів обираються із середнього часу спрацьовування вентиля існуючих найбільш технологічних графічних ВІС і необхідним часом на піксель шляхом розпаралелювання обчислювального процесу на відповідну кількість аналогічних кристалів, що пропорційно збільшує апаратні витрати).

Аналіз параметру  $E$  показує, що характеристики ГП можуть бути поліпшені шляхом збільшення параметра  $P_s$ , а збільшення інших параметрів ( $N_d$ ,  $N_c$ ,  $K_f$ , обумовлених специфікою застосування ВІС) впливає на збільшення параметра  $C$ . Збільшити  $P_s$  можна, як за рахунок використання більш швидкодіючої елементної бази, так і за рахунок використання більш швидкодіючих методів реалізації ГП. У свою чергу, використовуючи менш апаратноємні методи реалізації ГП, що зменшують  $C$ , можна збільшити ефективність  $Q_r$  або  $E$  уцілому.

**Вплив функціональності графічних систем на вимоги до процесорів.** Кожний із додатків комп'ютерної графіки накладає свої вимоги на функціональні параметри ГП за: роздільною здатністю ДКПВ; колірною роздільною здатністю; набору примітивів, які використовуються; точностю відтворення зображень за кольором та формою; швидкістю побудови зображень. У процесі синтезу ГП вирішується питання про прийнятний компроміс між вищенаведеними параметрами та витратами на їх реалізацію (програмними і апаратними), що в остаточному підсумку визначає функціональні параметри, реальної системи, яка створюється, та її вартість.

ГС використовуються при розв'язанні багатьох задач [5-8, 20, 21, 26]:

- відображення динамічних ситуацій у реальному масштабі часу при керуванні технологічними процесами, військовими об'єктами;
- відображення результатів та ходу наукових досліджень і експериментів;
- автоматизація проектування технологічних процесів, програмного забезпечення, архітектури,

дизайну, проектування великих інтегральних схем, розрахунку топології друкованих плат та ін.;

- статистична обробка даних (побудова гістограм, використання плавних кривих та ін.);
- обробка топографічної й картографічної інформації;
- обробки ділової, економічної та управлінської графічної інформації (кругові, стовпчикові та інші діаграми);
- обробка зображень штучних супутників Землі для вивчення земної поверхні;
- обробка біомедичних зображень (комп'ютерна томографія);
- моделювання реальних об'єктів в архітектурі, різних тренажерах та імітаторах (віртуальна реальність);
- завдання користувача людино-машинного інтерфейсу (меню, піктограми та ін.);
- комп'ютерне кіно, анімація, реклама, ігри (мистецтва).

У якості головних параметрів, за якими доцільно обирати ГП виступають [6-8, 23]:

- швидкодія, або час на один піксель зображення;
- роздільна здатність ДКПВ у ГС;
- роздільна здатність кольорових складових у ГС;
- апаратні витрати на ГП.

Проведемо оцінку вимог, до ГС з точки зору відтворення графічної інформації на пристрої відображення графічної інформації (ПВГІ) даної ГС за часом побудови одного пікселя.

Необхідна продуктивність ГП по побудові зображення становить [5, 6, 8]:

$$P_o = N_x \cdot N_y \cdot F_d \cdot K_e, \quad (13)$$

де  $N_x$  - роздільна здатність ПВГІ по горизонталі;

$N_y$  - роздільна здатність ПВГІ по вертикалі;

$F_d$  - динамічна частота зображення на екрані;

$K_e$  - коефіцієнт заповнення екрану ГС;

$t_p$  - час обробки одного пікселя;

Реальна продуктивність ПВГІ може бути визначена за наступним співвідношенням

$$P_r = \frac{K_v}{t_p}, \quad (14)$$

де  $K_v$  - коефіцієнт доступу до відеопам'яті за кадр, характеризує ступінь доступності відеопам'яті (як правило, для однопортової відеопам'яті  $K_v = 0,25 \div 0,35$ , для двопортової -  $K_v \approx 0,7$  [6, 8]).

Вираз для обчислення часу, необхідного для обробки одного пікселя (15) [6-8]:

$$t_p = \frac{K_v}{N_x \cdot N_y \cdot F_d \cdot K_e}. \quad (15)$$

Так, наприклад, деякі варіанти значення  $t_p$ :

1) для перспективних задач активної 3D графіки ( $F_d = 60 \text{ кадрів/с}$ ), з виконанням умови повної прозорості відеопам'яті ПВГІ ( $K_v = 1$ ), використання усього ДКПВ ( $165 \text{ Гпкселів}$ ) для ПВГІ ( $K_e = 1$ ) -  $t_p \approx 94,1(\text{фс})$ ;

2) для повної динаміки ( $F_d = 24 \text{ кадри/с}$ ) у режимі реального часу в завданнях комп'ютерної анімації або кінематографії, за умови повної прозорості відеопам'яті ПВГІ ( $K_v = 1$ ) і використання усього ДКПВ для ПВГІ ( $8192 \times 8192$ ) під зображення ( $K_e = 1$ ) -  $t_p \approx 0,62(\text{нс})$ ;

3) для задач машинобудування без динаміки зображення ( $F_d = 1$ ,  $K_v = 1$  та  $K_e = 0,2$  у просторі  $1280 \times 1024$ ) -  $t_p \approx 3,81(\text{мкс})$ .

Проаналізувавши особливості відтворення графічної інформації та усереднюючи вимоги до ГС можливо зробити висновок про те, що достатньо широкий клас задач машинної графіки може бути вирішений у ГС з розмірами ДКПВ від  $1280 \times 1024$  пікселів до  $8192 \times 8192$  пікселів з кольоровою роздільністю по 24 кольоровим площинам (по 8 двійкових розрядів на кожен складову кольору - R, G, B) і частотою відновлення усього зображення від 4 до 30 кадрів за секунду, а для перспективних задач активної 3D графіки - до 60 кадрів за секунду на ДКПВ розмірністю у 165 Гпкселів з кольоровою роздільністю по 48 кольоровим площинам (по 16 розрядів на R, G, B) [7].

**Приклад оцінки ефективності графічних процесорів.** Ринок графічних процесорів поділяють між собою такі виробники, як AMD, Intel, NVIDIA, SiS, VIA, причому, частка у 80% належить AMD та Nvidia, які володіють також 98% ринку дискретних відеокарт з безперечним лідерством Nvidia [8, 10, 24].

Відома діаграма параметрів процесорів (графічних і універсальних) та вимог до засобів машинної графіки [8]. За її допомогою виходячи із області застосування кожної конкретної ГС можна визначити параметри  $N_x \cdot N_y$  та  $F_d$ . Після цього, в залежності від доступу до відеопам'яті обирається значення  $K_v$ . Потім підібрати ГП, який буде задовольняти за параметрами вимогам вхідної задачі.

Для подальшої оцінки ефективності ГП визначимо  $Q_o$  (12). Дані для кожного із прикладів ГС узяті з відповідних сайтів виробників [8, 14, 28, 33, 34]. Параметри таких графічних процесорів та ВІС, як ГВ, ЦФГП1 та ЦФГП2 узяті з [6]. У якості абстрактного ідеалізованого процесора обрано ГП, який буде складатися з 32-х процесорів AMD RV790 [22, 28], що забезпечить необхідну швидкодію  $t_p \approx 94,1(\text{фс})$ , значення компонентів (12) такі:

$$P_{s \max} = 165 \times 2^{30} \times 60 \text{ [пікселів/с]; } N_{d \max} = 13 \times 2^{15};$$

$$N_{c \max} = 16;$$

$$K_{f \max} = 10; C_{\min} = 32 \text{ [млрд.тр.]}$$

Таким чином:  $Q_o = 1 \ 415 \ 124 \ 615$  [пікселів/(с·тр.)].

Відома таблиця прикладу значень параметрів ефективності для деяких ВІС ГП [6, 8] (табл.1).

Зміст скорочень у табл.1 такий:

ГВ - ВІС генератора векторів KA1515 XMI-107 [6, 17, 18];

ЦФГП1 - ГП для лінійної інтерполяції [6, 17, 18];

ЦФГП2 - ГП на ВІС БМК [6, 17, 18].

RV790 - ГП AMD [22, 28]

GTX 275 - ГП Nvidia [22, 24, 34]

Таблиця 1.

Приклад значень параметрів ефективності графічних процесорів

Графічний процесор	$P_s$ , пікселів/с	$N_x$	$N_y$	$K_f$	$C$ , тр.	$Q_r$ , пікселів/(с·тр.)	$E$
Ідеальний ГП	$165 \times 2^{30} \times 60$	425 984	16	10	32 млрд.	1 415 124 615	1,00000000
ГВ	1 700 000	12	0	1	12 800	1 594	0,00000113
ЦФГП1	7 000 000	12	0	1	27 984	3 002	0,00000212
ЦФГП2	5 000 000	16	0	2	$12800 \times 2$	6 250	0,00000442
RV790	666 666 666 667	34 133	16	9	959 млн.	213 653 806	0,1509788
GTX 275	333 333 333 333	12 600	16	9	1,4 млрд.	27 034 286	0,0191038

Порівняння даних ГП по ефективності  $Q_r$  та  $E$  (табл. 1) показує ефективність використання ГП AMD RV790.

Крім того існують поради по ефективній комбінації універсальних центральних процесорів із спеціалізованими ГП, наприклад, Intel DX58SO або Core i7 XE та GeForce GTX 295 [14].

## ВИСНОВКИ

1. 3D-сцену можна представити як набір окремих груп елементів: групи 3D-об'єктів, групи джерел освітлення, групи накладання текстурних карт, групи камер, які у результаті взаємодії одна із одною та їх обробки за допомогою спеціальних апаратних та програмних засобів можна організувати у єдиний процес, що систематизує правильну

обробку тривимірних об'ємних сцен. Етапи графічного конвеєра, складені у відповідну послідовність операцій, не є жорстко заданими, але є загальноприйнятими у сучасних графічних підсистемах. Дослідження етапів графічного конвеєру дозволяє сформулювати особливості сучасних GPU, як засобів машинної графіки:

1) виконання обробки складних 2D і 3D-зображень згідно стандартів OpenGL чи API DirectX [26, 27, 30, 31];

2) відповідність високій швидкодії з метою створення динамічних картин у межах до 50 млрд. пікселів/с, що забезпечується використанням синхрочастот до 1,25 ГГц, із внутрішньою швидкістю до 900 ГФлопс і внутрішніми циклами в межах 0,4-0,5 нс [8, 9];

3) апаратна реалізація функцій графіки; 4) активне використання технології шейдерів;

5) висока колірна роздільна здатність до 24, іноді - до 48;

6) можливість адресації відеопам'яті до одиниць Гбайт за стандартом GDDR;

7) орієнтація на 256-розрядну, а в окремих випадках на внутрішніх шинах, на 512-розрядну архітектуру в арифметиці із плаваючою крапкою з використанням паралельних структур;

8) орієнтацію на "класичні" алгоритмічні рішення [17, 20];

9) реалізація GPU у вигляді окремих, або набору великих інтегральних схем, що представляють собою комплекти для побудови графічних систем, як з можливістю програмування, так і спеціалізованих (як правило на базі 40-90 нм технологій, на кристаліх від 500 млн. до 2 млрд. транзисторів) [8, 30];

10) можливість використання деяких GPU у якості загальноцільових високопродуктивних паралельних процесорів [1, 5, 12, 30, 31].

2. Оскільки, людина є невід'ємною частиною обчислювального комплексу, до складу якого входять пристрої відображення графічної інформації, то головні вимоги до ПВГГ обумовлюються їх областю застосування та особливостями людино-машинної взаємодії. Отримано аналітичний вираз (3) для обчислення часу на обробку одного елемента зображення у ПВГГ. Здійснивши аналіз особливостей відтворення графічної інформації та усереднюючи вимоги до пристроїв відображення, можна сказати, що широкий клас задач по відтворенню графічної інформації може бути вирішений на пристроях відображення з розмірами ДКПВ від 1280×1024 пікселів (6) до 8192×8192 пікселів (5) з кольоровою роздільністю по 24 кольоровим площинам (по 8 двійкових розрядів на кожну складову кольору - R, G, B) і частотою відновлення всього зображення від 4 до 30 кадрів за секунду, а для перспективних задач активної 3D графіки - до 60 кадрів за секунду та ДКПВ у 165 Гпікселів (4).

3. Ринок графічних процесорів стрімко розвивається та залежить не тільки від технічних, але й від маркетингових причин, робити вибір, або порівняння ГП для графічних систем треба за деякими усередненими критеріями ефективності. Запропо-

новано інформаційно-апаратний критерій ефективності (10), який є оцінкою середньої продуктивності пристрою в пікселях за секунду, що припадає на один транзистор (вентиль) пристрою при побудові у ДКПВ, кожний з вимірів якого становить відповідну кількість біт, з визначеною кількістю біт на кожну із складових кольору та заданою складністю виведення графічних примітивів. Також запропоновано безрозмірний узагальнений критерій ефективності (11), який дозволяє зробити відносне порівняння ГП. Наведено приклади визначення параметрів ефективності ГП і діаграма параметрів процесорів та вимог до засобів машинної графіки.

### Список літератури

1. Адинец А. Графический вызов суперкомпьютерам [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.osp.ru/os/2008/04/5114497/> (дата обращения 20.05.2020). – Название с экрана.

2. Вентцель Е.С. Исследование операций / Вентцель Е.С. - М.: Сов.радио, 1972.- 552 с.

3. Войтко В.В. Аналіз основних підходів до формування шорстких поверхонь / Войтко В.В., Романюк О.В., Денисюк В.О. // Міжнародний науково-технічний журнал "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах". - Хмельницький, 2007р. - № 2 - С. 119-123.

4. Гончарук О.П. Алгоритм відображення водної поверхні / Гончарук О.П., Денисюк В.О. // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля, м. Луганськ, 2008. - №12(130) - Частина 2 - С.157-161.

5. Денисюк В.О. Аналіз етапів графічного конвеєру/ Денисюк В.О., Боднар А.В., Ліщинський О.В. // Міжнародний науково-технічний журнал "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах". - Хмельницький, 2009. - № 2 - С. 230-235.

6. Денисюк В.А. Исследование и разработка цифровых функциональных генераторов графических примитивов для устройств отображения информации: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.08 / Денисюк Валерий Александрович. - Винница.-1996.- 202 с.

7. Денисюк В.О. Дослідження вимог до пристроїв відображення графічної інформації з погляду людино-машинного інтерфейсу / Денисюк В.О., Денисюк А.В., Терешко В.О.// Міжнародний науково-технічний журнал "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах". - Хмельницький, 2008. - № 2 - С. 116-121.

8. Денисюк В.О., Цвілюк А.О., Чех О.І. Вибір процесору для графічної системи. Міжнародний науково-технічний журнал "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах". - Хмельницький, 2009. - № 2 - С. 146-152.

9. Денисюк В.О. Основні етапи графічного конвеєру / Денисюк В.О., Нікітченко Т.П., Нікітченко Н.П. // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля, м. Луганськ, 2008. - №12(130). - Частина 2 - С.110-114.

10. Интегрированные графические процессоры 11 поколения Ice Lake. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://i2hard.ru/publications/22939/> (дата обращения 20.05.2020). – Название с экрана.
11. Кузьмин И.В. Оценка эффективности и оптимизация автоматических систем контроля и управления. - М.: Сов.радио, 1971.- 296 с.
12. Любке Д. Графические процессоры - не только для графики [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.osp.ru/os/2007/02/4106864/> (дата обращения 20.05.2020). – Название с экрана.
13. Моисеев В.С. Системное проектирование преобразователей информации / Моисеев В.С. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1982.- 255 с.
14. Набережный А. NVIDIA GeForce GTX 285 и GTX 295. [Электронный ресурс].- Режим доступа: [https://itc.ua/articles/nvidia\\_geforce\\_gtx\\_285\\_i\\_gtx\\_295\\_-\\_flagmany\\_na\\_lyuboj\\_vkus\\_36951/](https://itc.ua/articles/nvidia_geforce_gtx_285_i_gtx_295_-_flagmany_na_lyuboj_vkus_36951/) (дата обращения 20.05.2020). – Название с экрана.
15. Нечай О. Тосихиро Сакамото: жизнь в высоком разрешении [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.terralab.ru/video/344394>. (дата обращения 20.05.2020). – Название с экрана.
16. Палташев Т.Т. Технология визуализации в компьютерном синтезе реалистичных изображений / Палташев Т.Т., Климина С.И., Лях А.С., Ю Вл. К. // Зарубежная радиоэлектроника. - № 6. - 1991. - С. 71, 96-108.
17. Петух А.М. Интерполяція в задачах контурного формоутворення [Монографія] / Петух А.М., Обідник Д.Т., Романюк О.Н.- Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007.- 103 с.- ISBN 978-966-641-223-5.
18. Петух А.М. Швидкодійні цифрові функціональні генератори графічних примітивів: монографія / А.М. Петух, В.О. Денисюк, Д.Т. Обідник.- Вінниця: ВНТУ, 2010.- 148 с. ISBN 978-966-641-343-0.
19. Пугач Е. GeForce 8800 GT 256 MB. [Электронный ресурс] . - Режим доступа: [https://itc.ua/articles/geforce\\_8800\\_gt\\_256\\_mb\\_bezh\\_alostnyj\\_ubijca\\_30193/](https://itc.ua/articles/geforce_8800_gt_256_mb_bezh_alostnyj_ubijca_30193/) (дата обращения 20.05.2020). – Название с экрана.
20. Роджерс Д. Алгоритмические основы машинной графики / Роджерс Д.; пер. с англ.- М.: Мир, 1989.- 512 с.- ISBN 5-03-000476-9.
21. Роджерс Д. Математические основы машинной графики / Роджерс Д., Адаме Дж.; пер. с англ. — М.: Мир, 2001. — 604 с. ISBN 5-03-002143-4.
22. Самый мощный однопроцессорный 3D-ускоритель от AMD. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.ixbt.com/video3/rv790.shtml#p1>. (дата обращения 20.05.2020). – Название с экрана.
23. Технология визуализации в компьютерном синтезе реалистичных изображений/ [Палташев Т.Т., Климина С.И., Лях А.С., Ю Вл.К.] // Зарубежная радиоэлектроника.- 1991.- № 6- С. 71, 96-108.
24. Тестирование графических карт на процессорах NVIDIA [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://compress.ru/article.aspx?id=20556>. (дата обращения 20.05.2020). – Название с экрана.
25. Филинюк Н.А. Критерий эффективности информационных устройств преобразования и управления / Филинюк Н.А. // Приборостроение. - 1984.- № 3- С. 3-8.
26. Херн Д. Компьютерная графика и стандарт OpenGL / Д. Херн, М. Бейкер; пер. с англ. - М.: Издательский дом "Вильямс", 2005.- 1168 с. - ISBN 5-8459-0772-1.
27. Чеботарёв А. OpenGL: раскрой глаза на трехмерную графику [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.comizdat.com>. (дата обращения 20.05.2020). – Название с экрана.
28. AMD Product Resource Center. [Electronic resource], - Mode of access: <https://www.amd.com/en/products/specifications>. (Accessed 20 May 2020). – Title from the screen.
29. АКА GTS 240” vs. GTX 285. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://people.overclockers.ru/MSport/record5>. (дата обращения 20.05.2020). – Название с экрана.
30. ATI RADEON HD 5870 1024MB. В преддверии DirectX 11. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ixbt.com/video3/cypress-part1.shtml>. (дата обращения 20.05.2020). – Название с экрана.
31. DIRECTX 12. [Electronic resource].- Mode of access: <https://www.nvidia.com/ru-ru/geforce/technologies/dx12>. (Accessed 20 May 2020). – Title from the screen.
32. Direct3D 12. [Electronic resource], - Mode of access: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Direct3D\\_12](https://ru.wikipedia.org/wiki/Direct3D_12). (Accessed 20 May 2020). – Title from the screen.
33. Intel Processors. [Electronic resource], - Mode of access: <http://ark.intel.com/Default.aspx>. (Accessed 20 May 2020). – Title from the screen.
34. Nvidia Tesla. GPU Computing Technical Brief. [Electronic resource]. - Mode of access: <http://www.nvidia.com>. (Accessed 20 May 2020). – Title from the screen.
35. Termblay C. Mathematics for Game Developer / Christopher Termblay. - Course Technology PTR, 2004. - 648 p. - ISBN 159200038X.
36. Ultimate Display Technologies. IEEE Computer Society, August 2005.- V. 38, No. 8.