МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ СОЦІАЛЬНОЇ ПЕДАГОГІКИ ТА ПСИХОЛОГІЇ
КАФЕДРА ДИЗАЙНУ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему: **ВИЯВЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕКСТУРУВАННЯ ДЛЯ РОЗРОБКИ 3D МОДЕЛІ ПЕРСОНАЖА В СТИЛІ СТІМПАНК ДО ГРИ «МІННЕ ПОЛЕ»**

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.0224-з-дн
спеціальності 022 «Дизайн»
освітньо-професійної програми «Графічний дизайн»
Крилова Поліна Іванівна

Керівник: доцент кафедри дизайну,
к.пед.н _____ Олександр БРЯНЦЕВ

Рецензент: доцент кафедри дизайну,
PhD _____ Ганна ЧЕМЕРИС

Запоріжжя

2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет *соціальної педагогіки і психології*
Кафедра *дизайну*
Рівень вищої освіти *другий (магістерський)*
Спеціальність *022 «Дизайн»*
Освітньо-професійна програма *«Графічний дизайн»*

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри дизайну
_____ Ганна ЧЕМЕРИС
«_____» _____20__ року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТЦІ

Криловій Поліні Іванівні

1. Тема роботи: *Виявлення технологічних особливостей 2D текстурування для розробки 3D моделі персонажа в стилі стімпанк до гри «Мінне поле»* науковий керівник роботи *к. пед. н., доцент Брянцев О.А.* затверджені наказом ЗНУ *№ 1393-с від 02.10.2025*
2. Строк подання студентом роботи: *2.12.25*
3. Вихідні дані до роботи: *відсутні*
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що належить розробити): *теоретичні основи дослідження технологічних особливостей текстурування; сутність та технологічні особливості текстурування; проєктування 3д персонажа в стилі стімпанк з використанням 2d текстурування*
5. Перелік графічного матеріалу: *презентація, демонстраційна графіка.*
6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Надано	Отримано

7. Дата видачі завдання: *03.11.24*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1	*Обрати тему і підготувати декларацію , заявку і лист завдання на затвердження теми і призначення керівника.*	*до 30.01.25*	
2	*Опрацювати понятєвий апарат дослідження та стан наукової дослідженості.*	*до 27.03.25*	
3	*Провести ретроспективний аналіз текстурування в комп'ютерній графіці*	*до 30.04.25*	
4	*Проаналізувати методики та технології текстурування*	*до 30.06.25*	
5	*Дослідити особливості технічної реалізації текстурування в програмних засобах*	*до 30.08.25*	
6	*Опрацювати аналіз використання методів текстурування на 3D персонажах*	*до 30.10.25*	
88	*Підготувати і подати до публікації тези у збірнику матеріалів міжнародної науково-практичної конференції Дизайн візуальне мистецтво та творчість: сучасні тенденції та технології*	*до 1.12.25*	
8	*Дослідити особливості стилю стимпанк*	*до 30.11.25*	
9	*Здійснити розробку персонажа зі стилім стімпанк*	*до 30.12.25*	
10	*Підготуватися до передзахисту*	*до 10.11.25*	
11	*Пройти перевірку нормоконтроля і рецензування і внести корективи відповідно зауважень.*	*до 30.01.26*	
12	*Пройти перевірку на плагіат і внести корективи покращення відносно звіту*	*до 31.01.26*	
13	*Підготувати друковані і електронні матеріали і передати для збереження в архіві і ресурсах кафедри.*	*до 8.02.26*	
14	*Підготуватися до захисту. Пройти захист.*	*до 21.02.26*	

Студент _____ *Поліна КРИЛОВА*

Науковий керівник роботи _____ *Олександр БРЯНЦЕВ*

Нормоконтроль пройдено
Нормоконтролер _____ *Ганна ЧЕМЕРИС*

АНОТАЦІЯ

Крилова П. І. Виявлення технологічних особливостей текстурування для розробки 3D моделі персонажа в стилі стімпанк до гри «Мінне поле» : кваліфікаційна робота магістра спеціальності 022 «Дизайн» освітньо-професійної програми «Графічний дизайн» / наук. керівник, к.пед.н, Брянцев О. А. Запоріжжя : ЗНУ, 2026. 111 с.

UA : Робота викладена на 111 сторінках друкованого тексту. Перелік посилань включає 103 джерело. Об'єкт дослідження: технологічні особливості текстурування. Предмет дослідження: текстурування 3D персонажів. Мета роботи: проаналізувати особливості текстурування і розробити 3д персонаж в стилі стімпанк. Теоретичний аналіз літератури 3D-моделювання з теми дослідження, вивчення передового досвіду західних дослідників, аналіз текстурування у 3D-моделюванні. В роботі над створенням моделі, було вивчено методи моделювання, стиль стімпанк, оптимізація текстур.

Ключові слова: текстурування, модель, стімпанк, моделювання.

Krylova P. I. Identification of Technological Features of Texturing for the Development of A 3D Model of a Steampunk Character for the "Minefield" Game : master's thesis in specialty 022 "Design" of the educational and professional program "Graphic Design" / scientific adviser, PhD, Briantsev O. A. Zaporizhzhia: ZNU, 2026. 111 c

EN : The work is presented on 111 pages of printed text. The list of references includes 103 sources. Object of the research: technological features of texturing. Subject of the research: texturing of 3D characters. Purpose of the study: to analyze the features of texturing and to develop a 3D character in the steampunk style. Theoretical analysis of 3D modeling literature on the research topic, study of best practices of western researchers, analysis of texturing in 3D modeling. In the work on creating the model, modeling methods, steampunk style, texture optimization were studied.

Key words: texturing, model, steampunk, modeling.

Апробація кваліфікаційної роботи:

1. Крилова П., Брянцев О. А. Сучасне текстурування об'єктів дизайну 3D графіки. *Дизайн візуальне мистецтво та творчість: сучасні тенденції та технології* : IV міжнародна науково-практична конференція (м.Запоріжжя, 12 груд. 2025). ЗНУ, 2025. Т. 2. С. 94-95.

ЗМІСТ

ВСТУП.....6
РОЗДІЛ 1
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕКСТУРУВАННЯ.....12
1.1 Стан наукової дослідженості технологічних особливостей текстурування. 12
1.2 Ретроспективний аналіз і наукова дослідженість текстурування в комп'ютерній графіці.....16
РОЗДІЛ 2
СУТНІСТЬ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТЕКСТУРУВАННЯ.....36
2.1 Методики та технології текстурування..... 36
2.2 Особливості технічної реалізації текстурування в програмних засобах...50
2.3 Аналіз текстурованих 3D персонажів.....60
РОЗДІЛ 3
ПРОЄКТУВАННЯ 3D ПЕРСОНАЖА В СТИЛІ СТІМПАНК З ВИКОРИСТАННЯМ 2D ТЕКСТУРУВАННЯ..... 67
3.1 Аналіз особливостей стилю стімпанк..... 67
3.2 Технологічні особливості персонажів створених в стилі стімпанк.....72
3.3 Створення та текстурування 3D персонажа.....87
ВИСНОВКИ.....96
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....99

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних умовах активного розвитку цифрових технологій індустрія комп’ютерних ігор посідає помітне місце серед креативних галузей, постійно висуваючи нові вимоги до якості візуального наповнення. Сучасні графічні рушії, програмні інструменти та апаратне забезпечення значно розширили можливості створення складних і детально опрацьованих 3D-об’єктів, що водночас підвищило очікування користувачів щодо рівня графіки. У цьому контексті тривимірні моделі персонажів відіграють ключову роль, адже саме вони формують перше враження про гру та безпосередньо впливають на рівень занурення гравця в ігровий простір.

Одним із важливих етапів створення 3D-персонажів є текстурування, яке визначає зовнішній вигляд моделі, її матеріальність і відповідність загальній художній концепції. За допомогою текстур передаються характерні властивості поверхонь, особливості матеріалів, ступінь різних ефектів, колірні рішення та декоративні деталі, що дозволяє сформувати цілісний і виразний образ персонажа. Водночас текстурування має не лише художнє, а й практичне значення, оскільки безпосередньо пов’язане з оптимізацією ресурсів і продуктивністю ігрових застосунків. Раціональний вибір текстурних карт, їх роздільної здатності та способів використання дає змогу досягти балансу між якістю візуалізації та технічними обмеженнями різних платформ.

Актуальність обраного вектору дослідження посилюється зростаючим інтересом до стилізованих ігор, у яких візуальна складова відіграє визначальну роль у формуванні унікальної атмосфери. Особливу увагу в цьому аспекті привертає стиль стімпанк, що поєднує елементи індустріальної епохи, механічні конструкції, ретрофутуристичні мотиви та фантастичні образи. Реалізація такого стилю у 3D-середовищі є технічно складною, оскільки потребує ретельного опрацювання текстур для передачі матеріалів, дрібних деталей і характерних візуальних акцентів. Недостатньо продумане

текстурування може призвести до спрощення образу та втрати стилістичної виразності персонажа.

У вузькому сенсі актуальність теми зумовлена практичною потребою створення 3D-моделі персонажа в стилі стімпанк. Особливо у межах конкретного ігрового проєкту важливо під час створення персонажу забезпечити його відповідність загальній стилістиці майбутньої гри. Надмірна деталізація або невдало підібрані текстури можуть негативно впливати на продуктивність гри та комфорт користувача, тому особливого значення набуває вибір ефективних технологій текстурування.

Згідно з сучасними тенденціями у графічному дизайні та геймдизайні, з огляду на зростаючі вимоги до якості тривимірної графіки, орієнтацію ігрових проєктів на виразну візуальну ідентичність, а також необхідність поєднання художньої стилізації з технічною ефективністю, і з урахуванням вищевикладеного, зазначимо, що тема нашого дослідження у формулюванні «*Виявлення технологічних особливостей текстурування для розробки 3D моделі персонажа в стилі стімпанк до гри Мінне Поле*» є актуальною.

Ступінь дослідженості питання. У різні роки дослідженнями в галузі 3D-моделювання займались такі українські вчені як: А. Деркач [7], В. Клівак [9], С. Пустюльга, В. Самостян [24] та інші. Серед українських дослідників значну увагу привертає дослідження В. Клівака, який вивчав особливості застосування 3D-моделювання у сучасному дизайні [9]. Серед зарубіжних вчених можна зазначити роботи – I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker [64]. Особливої уваги заслуговують роботи таких науковців як: B. Adams, M. Woolner, S. Mealing [86], L. Poly [88] J. Kelly [70].

Актуальність і теоретична значущість проектної проблеми дозволяє нам визначити предмет, об’єкт та завдання дослідження.

Об'єкт дослідження – технологічні особливості текстурування.

Предмет дослідження – текстурування 3D персонажів.

Мета роботи: проаналізувати особливості текстурування, технологій текстурування, етапи процесу текстурування, технології текстурування, що

застосовуються в сучасних програмних засобах комп’ютерної графіки, особливості технічної реалізації текстурування, приклади текстурованих 3D персонажів і розробити 3д персонаж в стилі стимпанк.

Виходячи з формулювання об’єкта, предмету та мети дослідження необхідно виконати наступні **завдання**:

1. Проаналізувати понятєвий апарат дослідження, пов’язаний із процесом текстурування в комп’ютерній графіці, визначити основні терміни, класифікації та принципи.

2. Здійснити ретроспективний аналіз розвитку технологій текстурування, дослідити наукову та технічну базу, що лежить в основі сучасних підходів до створення текстур.

3. Розкрити сутність і основні етапи процесу текстурування, охарактеризувати його роль у формуванні візуальної реалістичності 3D моделей.

4. Дослідити методики та технології текстурування, що застосовуються в сучасних програмних засобах комп’ютерної графіки (Substance Painter, Blender, Unreal Engine тощо).

5. Визначити особливості технічної реалізації текстурування, описати основні алгоритми, типи карт (diffuse, normal, specular, roughness тощо) та їх застосування у 3D-процесах.

6. Провести аналіз прикладів текстурованих 3D персонажів, виявити характерні прийоми й художньо-технологічні рішення при роботі з матеріалами та текстурами.

7. Розробити проєкт 3D персонажа у стилі стімпанк, обґрунтувати вибір візуального стилю, композиції, палітри кольорів та декоративних елементів.

8. Підготувати, протестувати та оптимізувати текстури для 3D моделі, забезпечивши збалансоване співвідношення між якістю візуалізації та продуктивністю.

Методи дослідження: для реалізації поставлених у кваліфікаційній роботі завдань було використано комплекс загальнонаукових,

дизайн-дослідницьких, проєктних та емпіричних методів. *Загальнонаукові методи* включають аналіз і синтез теоретичних джерел з питань 3D-графіки, текстурування та стилізації в геймдизайні; узагальнення наукових підходів до створення тривимірних персонажів; порівняльний аналіз існуючих ігрових рішень та візуальних прототипів у стилі стімпанк. *Методи дизайн-досліджень* передбачали вивчення та аналіз аналогів і референсів, дослідження стилістичних особливостей напряму стімпанк, метод предпроєктного аналізу, а також метод художньо-образного аналізу для формування цілісної візуальної концепції персонажа. *Проектні методи* включали метод синтезу в дизайні, комбінаторику, художньо-образне моделювання об’єкта дизайн-проектування засобами композиційного формоутворення, графічне та тривимірне проектування, а також поетапну розробку 3D-моделі персонажа з урахуванням вимог ігрового середовища. *Емпіричні методи* полягали у практичному тестуванні результатів текстурування в ігровому середовищі з подальшим збором статистичних даних, обробкою цих даних для аналізу візуального сприйняття моделі та технічних показників продуктивності, а також у коригуванні проектних рішень на основі отриманих результатів.

Концепція проєкту. В основі концепції кваліфікаційної роботи лежить ідея створення 3D-персонажа в стилі стімпанк, який поєднує художню виразність образу з технологічною доцільністю текстурування для використання в ігровому середовищі гри «Мінне поле». Концепція спрямована на формування впізнаваного персонажа з чітко окресленим візуальним характером, у якому механічні елементи, матеріали та декоративні деталі працюють як єдине стилістичне ціле. Основний акцент зроблено на використанні текстурування як ключового засобу передачі стилю стімпанк, з урахуванням обмежень ігрового рушія та необхідності оптимізації ресурсів. Концепція передбачає баланс між деталізацією та продуктивністю, що дозволяє забезпечити стабільну роботу гри без втрати художньої якості.

Наукова новизна, теоретичне та практичне значення кваліфікаційної роботи. Наукова новизна кваліфікаційної роботи полягає у дослідження

особливостей текстурування є у розробці авторського підходу до текстурування 3D-персонажа в стилі стімпанк для ігрового середовища, що поєднує художню стилізацію з технологічними вимогами ігрових рушіїв. У межах дослідження було створено автентичний візуальний образ персонажа з урахуванням специфіки стилю стімпанк, особливостей матеріалів, фактур і декоративних елементів, а також обмежень, пов’язаних з оптимізацією ігрових ресурсів. Запропоновані рішення дозволяють адаптувати художній задум до практичних умов розробки комп’ютерних ігор. Теоретичне значення роботи полягає в узагальненні та систематизації підходів до текстурування 3D-персонажів у стилізованих ігрових проектах, а також у поглибленні розуміння ролі текстур у формуванні цілісного візуального образу персонажа. Отримані результати можуть бути використані для подальших досліджень у галузі 3D-моделювання, геймдизайну та цифрового мистецтва. Практичне значення роботи, в можливості використання її матеріалів, результатів практичної реалізації та теоретичних напрацювань у навчальному процесі як методичного прикладу для студентів спеціальності «Графічний дизайн», а також у подальшій професійній діяльності, пов’язаній зі створенням 3D-контенту для комп’ютерних ігор та інтерактивних медіапроектів.

Апробація результатів дослідження здійснювалась шляхом публікації тез доповіді «Сучасне текстурування об’єктів дизайну 3D графіки» у збірнику матеріалів міжнародної науково-практичної конференції – Дизайн візуальне мистецтво та творчість: сучасні тенденції та технології (12.12.2025, Запоріжжя).

Структура пояснювальної записки. Пояснювальна записка складається зі вступу, 3 розділів, висновків та списку використаних літературних джерел. Повний обсяг пояснювальної записки – 111 аркушів, з них основний текст викладений на 84 сторінках. Список використаних джерел включає 101 найменування, з яких 54 – іноземними мовами. Робота містить 65 рисунків.

У *вступі* обґрунтовується актуальність дослідження, розкривається науковий апарат дослідження: мета, предмет, об'єкт, задачі, методи дослідження, наукова новизна, теоретичне та практичне значення роботи.

У першому розділі «Теоретичні основи дослідження технологічних особливостей текстурування» розглянуто стан наукової дослідженості проблеми текстурування в комп’ютерній графіці, проаналізовано основні поняття, терміни та класифікації, пов’язані з процесом створення текстур, а також здійснено ретроспективний аналіз розвитку технологій текстурування та науково-технічних підходів, що сформували сучасні методи роботи з 3D-графікою.

У другому розділі «Сутність та технологічні особливості текстурування» досліджено основні методики й технології текстурування, що застосовуються у сучасних програмних засобах комп’ютерної графіки, розкрито особливості технічної реалізації цього процесу, охарактеризовано типи текстурних карт і алгоритми їх використання, а також проведено аналіз прикладів текстурованих 3D-персонажів з метою виявлення характерних художньо-технологічних прийомів.

У третьому розділі «Проектування 3D персонажа в стилі стімпанк з використанням 2D текстурування» описано особливості стилю стімпанк та його застосування у 3D-моделюванні, проаналізовано приклади персонажів, створених у цьому стилі, а також представлено процес розробки власного 3D-персонажа, включно з підготовкою, тестуванням та оптимізацією 2D-текстур для забезпечення збалансованого поєднання візуальної якості й продуктивності ігрового середовища.

У висновках узагальнено результати теоретичного та практичного дослідження, сформульовано основні положення щодо технологічних особливостей текстурування 3D-персонажів, а також підбито підсумки реалізації проекту зі створення 3D-персонажа в стилі стімпанк з урахуванням вимог візуальної якості та оптимізації.

РОЗДІЛ 1
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕКСТУРУВАННЯ

1.1 Стан наукової дослідженості технологічних особливостей текстурування

У сучасних дослідженнях термін «текстура» трактується багатогранно, залежно від контексту його застосування. У сфері комп’ютерної графіки та дизайну він насамперед асоціюється з процесом текстурування, тобто накладанням зображень, матеріалів чи карт на 3D-моделі для надання їм реалістичного вигляду [28]. У роботі Н. Колесник зазначається, що текстурування – це «нанесення кольорів, візерунків і матеріалів на 3D-об'єкти», що дозволяє деталізувати їх поверхню та створювати ефект присутності віртуальних об’єктів у реальному просторі [10]. Подібної думки дотримується О. Галайко, яка підкреслює, що саме вибір текстур та техніка їх накладання визначають реалістичність тривимірної моделі, дозволяючи досягати правдоподібності у візуалізації [2].

Поняття «текстура» визначається як зовнішня будова матеріалу, зумовлена його складом та взаємним розташуванням частин, що проявляється, зокрема, у вигляді малюнка на зрізі деревини чи каменю; у ширшому розумінні цей термін уживається також для позначення своєрідності мовної тканини художнього твору або способу поєднання голосів у музиці, а в науково-технічному вжитку – для характеристики внутрішньої будови гірських порід та інших матеріалів.

Водночас у більш широкому культурному та мистецькому контексті текстура розглядається як один із базових візуальних елементів поряд із кольором, формою та лінією. Так, у дослідженні Н. Пантус і Н. Золотарчук наголошується, що саме текстура у поєднанні з іншими художніми засобами формує мову візуальної комунікації, дозволяючи не лише створювати естетичну цілісність, але й передавати смислове навантаження графічного образу [22].

Таким чином, текстура в дизайні виходить за межі технічного прийому і постає як носій значень та художніх акцентів.

Суміжним поняттям виступає «фактура», яка, на відміну від текстури, вказує на фізичні або імітовані властивості матеріалу, його тактильну і зорову якість. О. Храмова-Баранова визначає фактуру як одну з властивостей об’єктивного світу поряд з кольором і формою, що слугує засобом художнього вираження. У цифровому мистецтві вона часто використовується для передачі відчуття матеріальності – гладкості каменю чи шорсткості дерева, – створюючи додатковий рівень художнього впливу [37].

Узагальнюючи представлені тлумачення, можна зробити висновок, що найбільш коректним для використання в науково-методичному дискурсі є визначення текстури як візуально-структурної характеристики поверхні об’єкта, яка може бути відтворена або за допомогою технічних засобів комп’ютерної графіки (текстурування), або через художні засоби візуальної комунікації. У той час як фактура більшою мірою апелює до фізичної властивості матеріалу, текстура у цифровому дизайні й комп’ютерній графіці – це, радше, спосіб її візуального моделювання.

Спеціалісти навчального центру CADA визначають поняття «текстурування» як процес додавання текстур до 3D-об'єкта за допомогою комп'ютерної графіки або традиційних медіа, таких як фотографії, малювання чи відео [7]. Експерти з Adobe розширюють розуміння процесу, описуючи 3D текстурування як процес, де текстура може бути низкою повторюваних візерунків або унікальним зображенням, створеним спеціально для певної 3D-моделі [9].

Різницю між поняттями «2D текстурування» та «3D текстурування» Н. Колесник пояснює так: у першому випадку це процес нанесення візерунків, кольорів і деталей на двовимірні об’єкти в площині, де важливими є ширина та висота, а у другому – процес нанесення текстур на тривимірні моделі для надання їм кольору, матеріалів і деталей, включаючи карти нормалей, бампмапи та UV-розгортки [10].

О. Галайко додає, що 3D текстурування – це процес надання реалістичності зовнішньому вигляду тривимірного об’єкта, який дозволяє відтворювати його у просторі з різних ракурсів, поєднуючи цей етап із моделюванням, освітленням та іншими складовими 3D-графіки [2].

Основними інструментами для 2D-текстурування є програми для 2D-анімації, такі як Adobe Animate, Toon Boom або Moho. Саме ці програмні продукти забезпечують можливість деталізованого опрацювання форми, кольору і текстури, що дозволяє надати зображенню виразності, реалістичності та створити естетично привабливий візуальний простір.

Отже, основна різниця між 2D та 3D текстуруванням полягає у вимірах об’єктів і способі накладання текстур. У 2D текстурування відбувається на площині і оперує лише шириною та висотою, а його мета – створення графічного образу, який сприймається в площині. У 3D текстуруванні об’єкти мають глибину, і процес включає роботу з матеріалами, освітленням та перспективою для досягнення реалістичності тривимірної моделі. На думку В. Крук та В. Волох., 3D текстурування дозволяє більш гнучко та комплексно відтворювати природні фактури та матеріали, надаючи об’єктам більш “живий” вигляд, тоді як 2D текстурування більше фокусується на художньому та декоративному вираженні [13]. Завдяки цьому текстурування підвищує візуальну реалістичність об’єкта і створює основу для подальшого формування повноцінної 3D моделі.

В. Головань дає визначення «3D моделі» як об’ємного (тривимірного) відтворення реального чи уявного об’єкта дослідження з можливістю керування його ракурсами та масштабом відповідно до потреб користувача. З цього визначення випливає, що 3D модель не обмежується статичною формою: вона може відображатися у динамічній проєкції на екрані комп’ютера, ноутбука або смартфона завдяки технологіям 3D-малювання, які враховують перетворення розмірів та геометрії об’єкта, закони паралаксу, різні ракурси спостереження, а також оптичні властивості його поверхні та умови освітлення. Така комплексна реалізація забезпечує реалістичність моделі та дозволяє демонструвати всі боки

об’єкта, обертаючи його відносно спостерігача відповідно до його бажань чи потреб [3].

У тривимірному графічному просторі, важливо розуміти як створюються об’єкти в цифровому середовищі, такі як точки, лінії та полігони які взаємодіють між собою. 3D модель можна порівняти з об'єктами реального світу, оскільки вони відтворюють форму, співвідношення, розмір та інші характеристики реальних або вигаданих об'єктів у віртуальному просторі.

Напрям досліджень, пов’язаних із текстурою та її застосуванням у 2D і 3D моделюванні, охоплює широкий спектр проблем: від створення реалістичних поверхонь до оптимізації процесів візуалізації та інтерактивних середовищ. Текстурування є ключовим елементом комп’ютерної графіки, оскільки воно дозволяє надати моделям більшої деталізації та візуальної правдоподібності.

У сфері 2D текстурування значні дослідження проводили С. Пустюльга та В. Самостян, які вивчали методи нанесення текстур на плоскі об’єкти та оптимізацію растрових і векторних зображень [24]. Н. Пантус та Н. Золотарчук розглядали вплив дизайнерських рішень на ефективність текстур у графічних продуктах, підкреслюючи взаємозв’язок естетики та функціональності [22].

В. Крук та Л. Волох досліджували застосування фрактальних текстур для генерації складних поверхонь, що дозволяє досягати високого рівня деталізації при мінімальних обчислювальних витратах [13].

У напрямі 3D текстурування дослідження концентруються на інтеграції текстур з топологією моделей, освітленням та матеріалами. О. Романчук та Я. Лавренюк аналізували алгоритми нанесення текстур на тривимірні об’єкти та програмні засоби, які забезпечують точність і ефективність цього процесу [27]. Б. Пальчевський, Б. Валецький та Т. Вараніцький вивчали методи оптимізації 3D моделей з урахуванням текстурних карт та їх вплив на продуктивність рендерингу [21]. І. Ніколаєв досліджував використання обробки зображень для підвищення якості текстурування у відеоіграх, що дозволяє створювати більш реалістичні та ефективні візуальні сцени [18].

Особливу увагу також приділяють прикладним аспектам текстурування. В. Головань досліджував застосування 3D текстур для підготовки військових фахівців [3], Н. Оникієнко – для медичних моделей та підготовки до 3D-друку [20], Л. Чуб – для інтерактивних проєктів і віртуальної реальності [40]. Н. Колесник аналізував використання анімаційних текстур у motion-дизайні [10], а Л. Храмова-Баранова – у цифровому живописі [37]. О. Галайко вивчав навчальні аспекти роботи з текстурами у тривимірній графіці для старших класів, підкреслюючи важливість інтеграції практичних навичок і теоретичних знань [2].

Таким чином, сучасний стан досліджень у сфері текстурування характеризується поєднанням алгоритмічних, прикладних та освітніх підходів. Науковці приділяють увагу як технічним аспектам створення та оптимізації текстур, так і їхньому використанню в інтерактивних середовищах, ігровій індустрії, освіті та професійних сферах, що робить напрямок надзвичайно перспективним для подальших досліджень.

1.2 Ретроспективний аналіз і наукова дослідженість текстурування в комп'ютерній графіці

Як зазначають Б. Пальчевський, Б. Валецький та Т. Вараніцький у своїй роботі, першою людиною яка винайшла 3D-графіку є видатний інженер-інформатик А. Сазерленд. Він розробив програму Sketchpad у 1963 році яка дала великий поштовх революції. За допомогою світлового пера Sketchpad малює на дисплеї фігури, лінії, кола та змінювати їх в інтерактивному режимі [21]. Процес створення тривимірної цифрової моделі об'єкта складається з набору даних у вигляді вершин (точок у 3D просторі), ребер (ліній, що з'єднують точки) та полігонів (зазвичай трикутників), які формують полігональну структуру (див. рис 1.1). Моделювання грунтується на системі координат (X, Y, Z) [17].

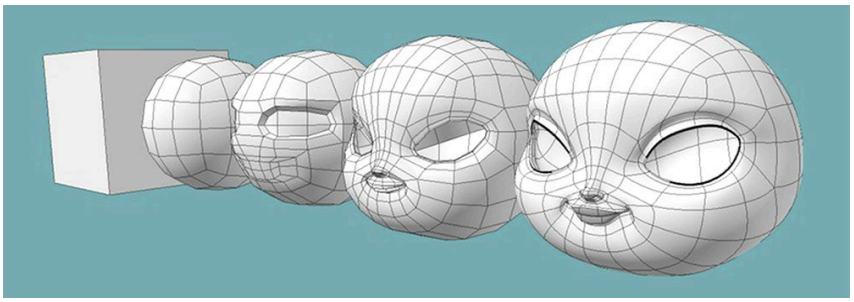


Рисунок 1.1 – Процес створення 3D моделі голови з полігонів. Ресурс: animost.com

Як зазначає О. Сушич у своїй роботі, особливий вплив 3D має галузь медицини. Створення тривимірних моделей є невід'ємною частиною досліджень будови організму, адже це дозволяє краще розуміти структуру тіла та точність втручань [35].

Крім того, 3D моделювання значно полегшує роботу інженерів, особливо на стадії проєктування. Створення точних тривимірних моделей, дозволяє їм виявити проблеми ще до початку виробництва протеза та оптимізувати його ще у програмі, до друку на принтері, що значно полегшує роботу та призводить до зниженню втрат.

Текстурування (див. рис 1.2) важлива частина процесу 3D моделювання, оскільки саме воно надає поверхні об’єкта реалістичний вигляд і деталізацію. За допомогою текстур імітують кольори, фактури, блиск, матовість, рельєф та інші фізичні властивості матеріалів, що робить модель більш живою та переконливою [5].

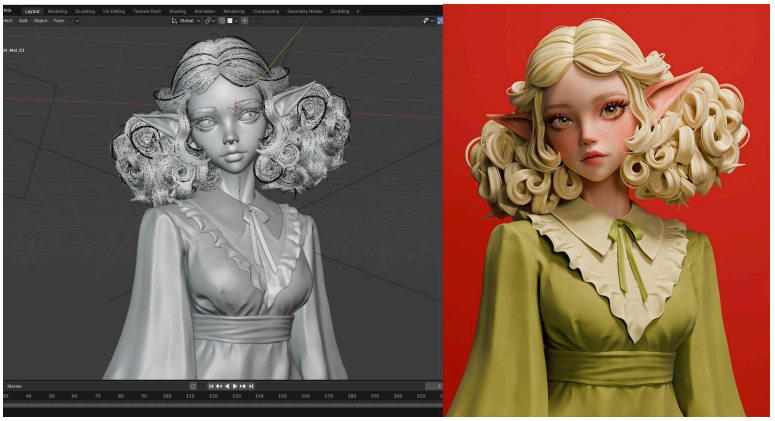


Рисунок 1.2 – 3D модель та її текстурування. Ресурс: pinterest.com

Текстура допомагає надати розуміння глядачу про матеріали об'єкта, просто поглянувши на його поверхню. Під впливом світла кожен об'єкт проявляє різне відбиття, заломлення, випромінювання. Для реалізації цих ефектів у 3D використовують складні методи рендерингу, такі як трасування променів (ray tracing), яке імітує фізичну поведінку світла, аналізуючи його взаємодію з поверхнями об’єктів.

Обробка 3D об'єктів програмним забезпеченням стала б великою проблемою, якби кожна деталь на поверхні 3D елемента була змодельована окремо [18]. Однак ця проблема вирішується, за допомогою текстурування, яке дозволяє додавати деталі, такі як зморшки, шрами, тріщини та нерівності, на поверхню моделей, не перевантажуючи програмне забезпечення та допомогаючи досягти потрібного ефекту оминаючи дрібне і складне моделювання.

Процес текстурування будь-якої моделі починається з її розгортки. Розгортка – це UV карта, яка являє собою плоску поверхню 3D моделі, що використовується для швидкого текстурування. Фактично це двовимірне розгортання тривимірної форми. Більшість програмних систем 3D мають кілька інструментів або підходів для розгортання 3D-моделей. Іноді розгортання виконується вручну, особливо для персонажів. Проте ручне розгортання займає більше часу, але значно полегшує процес фарбування [21]. UV мапінг допомагає створити більш реалістичний вигляд 3D моделей, оскільки він забезпечує точне накладання текстур на поверхню тривимірного об’єкта (див. рис 1.3).

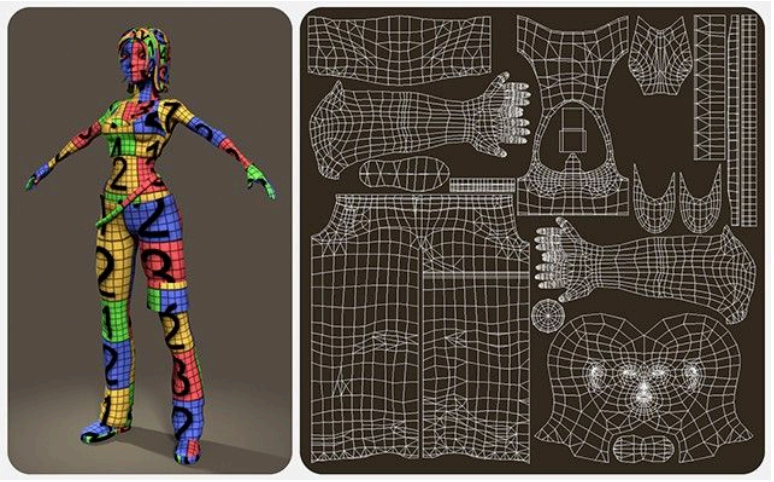


Рисунок 1.3 – Розгортка на плоскій поверхні. Ресурс: pinterest.com

3D-модель можна порівняти зі скульптурою яку треба розмалювати кольорами та деталями, за допомогою текстури [51]. За використанням текстурування поверхня моделі набуває кольорами, візерунками, шорсткістю, зморшками, подряпинами та іншими дрібними деталями, які роблять об’єкт живим і реалістичним. Це полегшує процес малювання та створення текстур.

Текстурування в комп’ютерній графіці є ключовим етапом створення реалістичних тривимірних сцен, оскільки дозволяє надати об’єктам деталі, колір і фактуру без значного збільшення геометричної складності. Історично цей процес відбувався від простих двовимірних накладок до складних процедурних та тривимірних текстур, що імітують фізичні властивості матеріалів.

Постійна еволюція графіки відеоігор захоплює і протягом багатьох років впливає на ігрову індустрію. Завдяки прогресу удосконалення графіки відеоігор, у розробників ігор з'являються можливості створювати нові світи, які захоплюють та дивують.

У 1970–1980-х роках комп’ютерна графіка була обмежена простими візуальними елементами. Текстури майже не використовувалися, а графіка складалася переважно з плоских векторів або простих піксельних патернів. Прикладом таких ігор є ранні аркадні проєкти, зокрема Space Invaders та Pac-Man.

У грі Space Invaders (1978) гравець керує гарматою, що рухається по горизонталі, і стріляє по хвилях прибульців, що спускаються з верхньої частини екрану. Графіка гри виконана у стилістиці піксельного арту з мінімальними деталями, що характерно для того часу (див. рис. 1.4.)

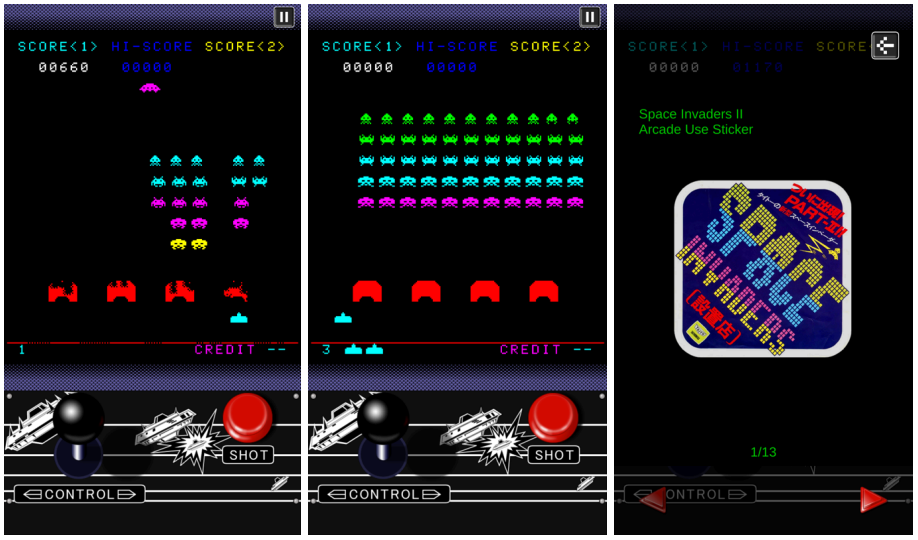


Рисунок 1.4 – Space Invaders. Інтерфейс гри. Ресурс: play.google.com

У грі Pac-Man (1980) гравець керує персонажем, що пересувається лабіринтом, поїдаючи точки та уникаючи привидів (див. рис. 1.5). Хоча графіка гри дещо складніша, вона все ще обмежена піксельним стилем без використання текстур.



Рисунок 1.5 – Pac-Man. Графіка. Ресурс: pacman.com

8-бітний період в історії комп'ютерних ігор став етапом максимально спрощеної графіки із квадратними формами та незрозумілими фігурами. Графіка 8-бітних ігор складається з точок, кожен з яких має свій колір. Через обмеженість дизайнерам доводилось використовувати мінімум кольорів, але такий стиль формував унікальну естетику, яку використовують навіть і до нині [40].

Ці ігри стали класикою ілюструють перші кроки у розвитку комп’ютерної графіки, де основна увага приділялася геймплею та механіці, а не візуальним ефектам. Сучасні ігри часто використовують піксельний стиль для створення проєктів, це доводить що естетика перших ігор не лише зберігає актуальність, та ще впливає на сучасний дизайн ігор. Отже, ідеї в ті часи мали велике значення для закладення бази майбутніх проєктів.

В середину вісімдесятих, почали використовувати 16-бітну графіку з надією, що з’явиться більша палітра кольорів, анімація буде більш плавною, а фони детальнішими. З появою 16-бітної графіки палітра кольорів розширилась, порівняно з попередньою 8-бітною системою. Якщо 8-бітна графіка відображала всього 256 кольорів, то 16-бітна вже могла відображати 65,536 кольорів. Це стало можливим завдяки теорії кольору, трьох основних кольорів, червоного, зеленого та синього (RGB), такий перехід забезпечив більше кольорів в палітрі, що покращує якість зображення в комп'ютерних іграх [16]

Використання 2D bitmap-текстур стало можливим завдяки зростанню потужності комп’ютерів, хоча обмеження пам’яті все ще накладали обмеження на роздільну здатність текстур. Цей період ознаменувався появою перших спроб імітувати реалістичні поверхні в ігрових середовищах.

Одним зі знакових прикладів того часу є гра Wolfenstein 3D, випущена в 1992 році (див. рис. 1.6). Розроблена компанією id Software, вона стала однією з перших ігор, що використовувала текстури для створення стін і інших елементів середовища.

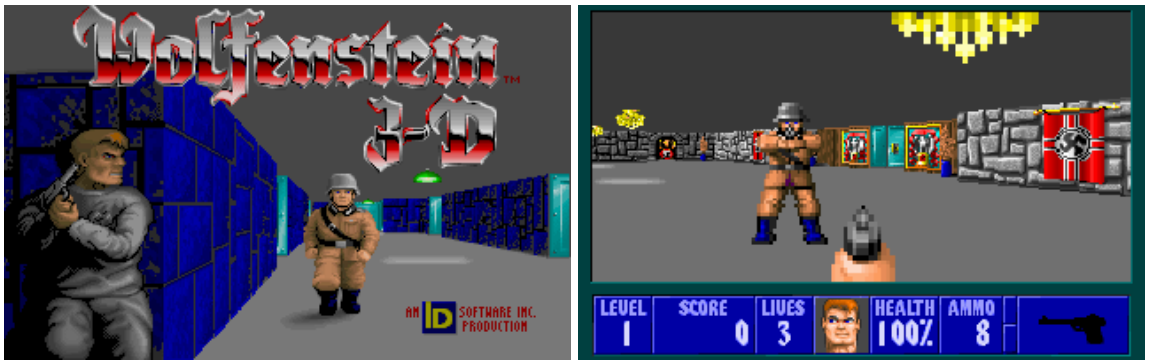


Рисунок 1.6 – Wolfenstein 3D. Графіка. Ресурс: store.steampowered.com

Ці текстури були зображеннями низької роздільної здатності, що накладали певні обмеження на візуальну якість, але водночас дозволяли створити більш реалістичне ігрове середовище порівняно з попередніми іграми. 3D текстури стін були представлені 2D bitmap-зображеннями, які накладалися на поверхні ігрового світу. Цей підхід дозволяв створювати враження об'ємних стін і приміщень, хоча насправді гра використовувала техніку псевдотривимірної графіки. Завдяки цьому гравці могли відчувати себе частиною тривимірного світу, навіть якщо технічні обмеження не дозволяли реалізувати повноцінну 3D-графіку.

У 1990-х роках комп’ютерна графіка зробила значний крок уперед завдяки впровадженню UV-координат та текстурних карт. Ці технології дозволили «натягувати» 2D-зображення на 3D-моделі, що значно покращило візуальну якість ігор того часу. З’явилися також перші light maps – спеціальні текстури, що імітують освітлення, надаючи сценам більшої реалістичності. Яскравими прикладами використання цих технологій стали ігри Quake та Unreal.

У Quake (1996) від id Software (див. рис. 1.7) текстурні карти та UV-розгортка були використані для створення повністю тривимірного середовища, яке відрізнялося від попередніх псевдотривимірних ігор.



Рисунок 1.7 – Quake. Графіка. Ресурс: Youtube.com

Кожна стіна, підлога та стеля отримала власну текстуру, що накладалася відповідно до UV-координат, завдяки чому сцени виглядали значно реалістичніше. Крім того, Quake ввів підтримку dynamic lighting і light maps, що дозволило моделювати освітлення і тіні без значного зниження продуктивності. Це створювало більш атмосферні підземелля, печери та відкриті простори, додаючи грі глибину та відчуття присутності в об’ємному світі

Unreal (1998) від Epic Games (див. рис. 1.8) значно розширив можливості текстурування та візуалізації. Гра використовувала високоякісні UV-текстури для об’єктів і ландшафтів, а також детальні light maps для імітації складного освітлення.



Рисунок 1.8 – Unreal. Графіка. Ресурс: myabandonware.com

Архітектура рівнів включала криволінійні поверхні, що дозволяло створювати більш природні та органічні простори. Візуальна насиченість ігрових сцен, комбінована з динамічними ефектами освітлення та тіней, зробила Unreal однією з найвизначніших ігор свого часу, заклавши стандарти для майбутніх 3D-шутерів і рольових ігор

У кінці 1990-х років, зокрема в 1998 році, відбулося впровадження міп-мапінгу та фільтрації текстур. Міп-мапінг передбачає створення кількох копій однієї текстури з різною роздільною здатністю, що дозволяє оптимізувати відображення текстур на об’єктах, залежно від їхнього розміру на екрані та відстані до камери. Ця техніка зменшує мерехтіння та покращує продуктивність, оскільки графічний процесор використовує найбільш відповідну копію текстури для кожного випадку. Фільтрація текстур, зокрема лінійна та анізотропна, дозволяє покращити якість відображення текстур під різними кутами огляду, зменшуючи ефект розмиття та зберігаючи чіткість деталей.

Одним із яскравих прикладів застосування цих технологій є гра Half-Life (1998), розроблена компанією Valve (див. рис. 1.9). Вона використовувала міп-мапінг для оптимізації відображення текстур на різних відстанях, що дозволяло зберігати високу якість зображення та покращувати продуктивність гри.



Рисунок 1.9 – Half-Life. Графіка. Ресурс: store.steampowered.com

Анізотропна фільтрація, у свою чергу, забезпечувала чіткість текстур навіть при перегляді під гострими кутами, що особливо помітно на поверхнях, таких як підлога чи стіни, коли гравець рухається по рівнях гри. Ці технології стали стандартом для більшості 3D-ігор того часу, значно підвищивши якість візуального відображення та забезпечивши більш реалістичний ігровий досвід.

У 2000-х роках, з виходом гри Doom 3 у 2004 році (див. рис. 1.10), комп’ютерна графіка зробила значний крок уперед завдяки впровадженню технологій бамп-мапінгу та нормал-мапінгу. Ці методи дозволили значно покращити візуальну деталізацію об’єктів без необхідності збільшувати кількість полігонів, що було важливим для підтримки високої продуктивності гри.



Рисунок 1.10 – Doom 3. Графіка. Ресурс: store.steampowered.com

Doom 3 використовував три основні типи текстур: дифузні карти (diffuse maps), нормальні карти (normal maps) та спекулярні карти (specular maps). Нормальні карти дозволяли імітувати деталі рельєфу, такі як виступи та западини, шляхом зміни напрямку нормалей поверхні, що впливало на освітлення об’єкта. Спекулярні карти визначали, як поверхня відбиває світло, що додавало реалізму відображенням та блиску матеріалів.

Ці технології були реалізовані завдяки використанню шейдерів, які обчислювали освітлення на рівні пікселів, що дозволяло досягти високої деталізації навіть на низькополігональних моделях.

Вдосконалення рендерингу призвели до значної еволюції ігрової графіки, яка надала широкий спектр стилів, від реалістичних текстур до чітких стилізацій, завдячуючи вдосконаленому текстуруванню та динамічним світловим ефектам [19].

Найбільшим проривом у 2001 році став Silent Hill 2 з використання тіней у реальному часі, PlayStation 2, дозволив покращити анімацію, ефекти туману і тіні, що значно посилило атмосферу гри (див. рис 1.11). Тіні та туман в реальному часі створили відчуття страху і напруги [82].



Рисунок 1.11 – Silent Hill 2. Графіка. Ресурс: igdb.com

У 2010-х роках у комп'ютерній графіці відбулися значні зміни завдяки впровадженню технології Physically Based Rendering (PBR), яка дозволила досягти фотореалістичного зображення завдяки моделюванню фізичних властивостей матеріалів. Цей підхід базується на використанні карт Albedo, Roughness, Metallic, Normal та Ambient Occlusion, що дозволяє точно відтворювати взаємодію світла з поверхнями [54].

Unreal Engine 4 (UE4) став одним із перших ігрових рушіїв, який впровадив PBR на основі моделі Disney «Principled BSDF» [93]. Це дозволило художникам створювати матеріали, які коректно реагують на освітлення в різних умовах, забезпечуючи високу якість зображення. UE4 підтримує використання карт Albedo, Roughness, Metallic, Normal та Ambient Occlusion, що

дає змогу досягти реалістичних ефектів освітлення та відображень (див. рис. 1.12).



Рисунок 1.13 – Unreal Engine . Графіка. Ресурс: GameFromScratch.com

Unity, у свою чергу, розробила Book of the Dead (HDRP), що також підтримує PBR. HDRP дозволяє створювати високоякісні візуальні ефекти завдяки використанню фізично коректного освітлення та матеріалів. Він містить підтримку карт Albedo, Roughness, Metallic, Normal та Ambient Occlusion, що дозволяє досягти високого рівня деталізації та реалістичності візуальних ефектів (див. рис. 1.13).



Рисунок 1.13 – Book of the Dead. Графіка . Ресурс: youtube.com

З 2000-х по 2018 року, розвиток ігор поступово розвивається, графіка покращилась, а з нею і реалізм, з виходом Xbox 360, PlayStation 3 значно підвищились стандарти якості графіки, з'явилися ігри з підтримкою 4K дисплеїв, реалістичними освітленнями та деталізацією моделей, це дозволило створювати більш захопливі світи. З 2000-х активно почали розвиватись

багатокористувацькі онлайн ігри такі як World of Warcraft (2004), що сприяло зростанню активності ігроків [71].

Red Dead Redemption 2 встановила новий стандарт фотореалістичної графіки в іграх з відкритим світом (див. рис 1.14).



Рисунок 1.14 – Red Dead Redemption 2. Графіка. Ресурс: rockstargames.com

Випущена студією Rockstar Games у 2018 році гра відзначається неймовірною деталізацією віртуального світу, який живе за власними законами, з реалістичними змінами погоди, циклом дня і ночі, а також багатством дрібних деталей, від текстур природи до анімації персонажів і тварин, з ретельною увагою до деталей, динамічними погодними системами та реалістичною анімацією персонажів, створивши один із найбільш захоплюючих ігрових світів, коли-небудь розроблених.

У 2020-х роках комп’ютерна графіка досягла нового рівня завдяки технологіям фотореалістичних текстур, сканування за допомогою фотограмметрії та процедурного текстурування. Ці інновації дозволили створювати високоякісні матеріали з високою роздільною здатністю (8K+), seamless-текстури та реалізувати трасування променів у реальному часі. Гра Cyberpunk 2077 стала прикладом використання цих технологій. Розробники застосували фотограмметрію для створення реалістичних текстур, що дозволило досягти високої деталізації об'єктів і поверхонь. Процедурне текстурування, зокрема за допомогою таких інструментів, як Substance Designer,

дозволило створювати складні матеріали з мінімальними затратами часу. Висока роздільна здатність текстур та seamless-матеріали забезпечили плавний перехід між різними поверхнями без видимих швів. Технологія трасування променів у реальному часі додала додаткову глибину та реалістичність освітленню у грі (див. рис. 1.15).



Рисунок 1.15 – Cyberpunk 2077. Графіка. Ресурс: imdb.com

Unreal Engine 5 також впровадив інноваційні технології, зокрема Nanite та Lumen. Nanite дозволяє використовувати візуалізацію мікрополігонів, що забезпечує високий рівень деталізації геометрії без значного впливу на продуктивність [93]. Lumen, у свою чергу, є рішенням для динамічного глобального освітлення, яке миттєво реагує на зміни сцени та освітлення, забезпечуючи реалістичне освітлення в реальному часі. Ці технології дозволяють створювати сцени з високою деталізацією та реалістичним освітленням, що значно покращує візуальне сприйняття в іграх та інших інтерактивних додатках (див. рис. 1.16).

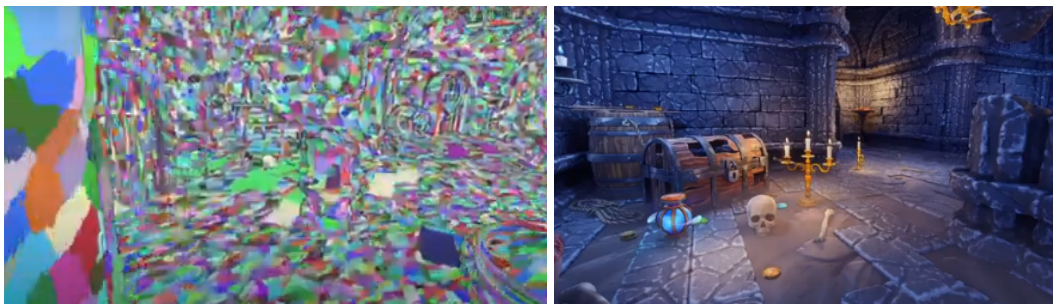


Рисунок 1.16 – S.t.a.l.k.e.r . Технології Nanite та Lumen. Ресурс: youtube.com

Зараз комп’ютерна графіка використовується не лише в іграх, але й у багатьох інших сферах діяльності людини. Сучасні технології внесли кардинальні зміни в практично всі сфери діяльності людини, автоматизувавши процеси, що призвело до зниження втрат та підвищення ефективності роботи. Створені для друку 3D моделі допомагають вченим вивчати складні дослідження, уникаючи великих втрат. Це дозволяє швидко тестувати та аналізувати дослідження, що особливо корисно для наукових експериментів, де важлива швидкість та точність [20].

У дизайні реклам 3D технології стали новим трендом, дозволивши використовувати реалістичний контент. 3D-моделювання використовують для анімованих відео товару, що дає змогу клієнтам побачити продукт у реалістичному вигляді, так би мовити, оцінити його, що підвищує довіру та стимулює на покупку [40] (див. рис 1.17).



Рисунок 1.17 – Модель і мокап упаковки. Ресурс: in.pinterest.com

Використання 3D ілюстрації теж набувають чинності у сучасному графічному дизайні, значно приваблюючи інтерес читача. Такі ілюстрації дозволяють створювати обємні зображення, які можна показати з різних сторін, роблячи їх більш сучасним [4].

Загалом такий підхід у графічному дизайні додає вартість брендам, сприяючи підвищенню актуальності використання 3D об'єктів для

рекламування продукту та приваблення аудиторії.Одними з найсучасніших та найприбутковіших бізнесів є кіноіндустрія та геймінг. У кінематографі 3D-технології дозволяють створювати реалістичні візуальні ефекти, складні анімації та захопливі світи, які неможливо відтворити традиційними методами. Наприклад, фільм «Аватар» Д. Кемерона, який став найбільш касовим у світі, значною мірою базувався на інноваціях у 3D візуалізації та анімації, що принесло майже $3 млрд прибутку і змінило кіноіндустрію [43]. Адже саме завдяки високоякісним цифровим анімаціям та реалізму текстур, аудиторія сприймає образи, що викликають емоції та занурення в сюжет серіалу або фільму.

У геймінгу 3D графіка постійно розвивається завдяки новітнім технологіям, таким як Unreal Engine 5, який вже дозволяє створювати сцени в іграх як в кіно. Цей сучасний рушій пропонує потужні інструменти для створення реалістичної графіки, динамічного освітлення, що дуже підвищує якість ігор. Дуже гарним прикладом буде українська гра S.T.A.L.K.E.R. 2, розробники використовували Unreal Engine 5, балансуючи між стилем попередніх ігор, зберігаючи атмосферу і додаючи сучасне графічне рішення [79]. Хоча гра ще потребує доробок та оптимізації, вона є прикладом, як новітні технології можуть покращити графіку, і створити красиву атмосферу (див. рис 1.18).



Рисунок 1.18 – S.T.A.L.K.E.R. 2. Графіка. Ресурс: youtube.com

Розвиток текстурування в комп’ютерній графіці можна простежити через внески ключових дослідників і компаній. Уже у 1974 році Е. Кетмулл у своїй докторській дисертації запропонував методику текстурного відображення поверхонь за допомогою UV-координат [5]. У 1970–1980-х роках компанії Atari та Namco експериментували з першими візуальними патернами у відеоіграх, таких як Battlezone та Pole Position.

На початку 1990-х років активно розвивалося використання bitmap-текстур та UV mapping. Д. Кармак із компанії id Software запровадив текстуровані стіни у Wolfenstein 3D та вдосконалив метод у Doom, а UV-розгортка паралельно досліджувалася у наукових колах університетів Юти та в Pixar під керівництвом К. Нортона та А. Нортона.

У кінці 1990-х значну увагу приділяли технології mip-mapping і методам фільтрації. Л. Вільямс ще у 1983 році описав концепцію mip-mapping у статті Pyramidal Parametrics, а наприкінці десятиліття ця технологія була реалізована в іграх Quake та Unreal [98].

2000-ні роки ознаменувалися розвитком bump і normal mapping. Ідея bump mapping була запропонована Д. Бламбергом та Д. Блінном ще у 1978 році, тоді як normal mapping отримав масове поширення завдяки дослідженням у Microsoft Research і використанню в *Doom 3* компанії id Software.

У 2010-х ключовим напрямом став PBR (Physically Based Rendering). Модель Disney BRDF, опублікована дослідниками Disney Research у 2012 році, заклала основу сучасного PBR, а Epic Games та Unity впровадили технологію у широке використання в іграх [54].

У 2020-х розвиток текстурування зосередився на фотореалізмі та процедурних методах. Компанія Allegorithmic, що створила Substance Designer і Painter, активно розвивала процедурне текстурування, а Quixel Megascans просував фотограмметрію у геймдеві. NVIDIA та Epic Games, у свою чергу, впроваджують технології real-time ray tracing та інновації Nanite і Lumen в Unreal Engine 5.

Сучасні українські науковці активно досліджують різні аспекти текстурування та розробки тривимірної графіки, що є важливим для розвитку комп'ютерної індустрії та цифрового дизайну. О. Романюк у своїй праці присвяченій аналізу найпопулярніших пакетів прикладних програм для текстурування детально розглядає їхні можливості та функціональні особливості [28]. Він підкреслює, як вибір програмного забезпечення впливає на ефективність створення тривимірних моделей та якість кінцевих зображень, що дозволяє оптимізувати роботу дизайнерів та художників у сфері комп'ютерної графіки.

Разом з тим, О. Романюк у співавторстві з М. Захарчуком розробили методи процедурного текстурування, що передбачають автоматизацію створення текстур і підвищення продуктивності при формуванні тривимірних об'єктів. У своїх дослідженнях вони детально описують алгоритми та підходи, які дозволяють отримувати реалістичні поверхні без потреби у ручному створенні кожного елемента текстури, що значно спрощує роботу над великими проєктами [31].

Дослідники приділяли увагу організації та використанню баз даних для задач текстурування тривимірних зображень. Вони досліджують питання структурування інформації, оптимізації доступу та управління даними, що дозволяє ефективно зберігати великі об'єми графічних ресурсів та забезпечує швидкий доступ до необхідних текстур у процесі розробки цифрових моделей [30].

Є. Станіславенко концентрувався на текстуруванні під час формування тривимірних персонажів. Його робота зосереджена на технічних аспектах, методах оптимізації та підвищення реалістичності зображень, що особливо важливо у створенні комп'ютерних ігор, анімаційних фільмів та віртуальної реальності. Дослідження дозволяють забезпечити високу якість персонажів при мінімальних витратах часу та ресурсів [40].

А. Лиша досліджував розроблення сету 3D-моделей атрибутів комп'ютерної гри. Він аналізує способи створення та організації тривимірних

об’єктів, що забезпечує ефективне використання готових моделей у процесі розробки ігор та інших інтерактивних середовищ. Його робота підкреслює важливість стандартизації та уніфікації моделей для спрощення інтеграції у цифрові проєкти та підвищення продуктивності команд розробників [14].

Сучасні зарубіжні науковці також активно досліджують проблеми текстурування та синтезу зображень у галузі комп’ютерної графіки та візуалізації. H. Xinrong та M. Msembgan у своїй роботі присвяченій багатошаровому синтезу вишивки розробили методи генерації текстур із врахуванням регіональних особливостей. Вони демонструють ефективність підходів, які дозволяють отримувати реалістичні та деталізовані вишивальні патерни, забезпечуючи природне об’єднання різних ділянок зображення та високу якість кінцевого результату [100].

C. Rodriguez-Pardo та E. Garces зосереджувалися на безшовному синтезі плиткових текстур за допомогою самоконтрольованого підходу SeamlessGAN. Їхня робота демонструє можливості генеративних нейронних мереж у створенні повторюваних текстур, які легко інтегруються у тривимірні сцени або цифрові середовища, мінімізуючи помітні шви та артефакти [77].

A. Schodl у своїй праці досліджував відеотекстури, пропонуючи методи їх створення та використання для динамічних сцен. Він демонструє, як за допомогою автоматичного повторення та комбінування коротких відеофрагментів можна формувати плавні циклічні анімації, що значно розширює можливості художників і розробників візуального контенту [80].

G. Daiheng розробив модель DART, яка поєднує артикуляційне моделювання рук із різноманітними аксесуарами та багатими текстурами. Це дослідження підкреслює важливість детальної візуалізації об’єктів для інтерактивних застосунків, таких як віртуальна реальність та ігрові симуляції, забезпечуючи реалістичне відтворення складних поверхонь і матеріалів [59].

A. Efros та W. Freeman зосереджувалися на методі Image Quilting для синтезу та перенесення текстур. Їхній підхід дозволяє ефективно комбінувати фрагменти існуючих зображень, створюючи нові текстури та забезпечуючи

високий рівень деталізації та природності. Робота демонструє потужність алгоритмічних методів у синтезі реалістичних зображень і значно вплинула на розвиток сучасної комп’ютерної графіки [62].

РОЗДІЛ 2
СУТНІСТЬ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТЕКСТУРУВАННЯ

2.1 Методики та технології текстурування

Сучасна комп’ютерна графіка використовує різноманітні техніки та технології для створення переконливих поверхонь, кожна з яких вирішує специфічні завдання візуалізації. Текстура відіграє важливу роль у створенні реалістичних та виразних 3D-персонажів і середовищ. Вона допомагає передати характер, емоції та атмосферу, викликаючи відповідні відчуття за допомогою кольорів, візерунків і глибини деталей на поверхнях об'єктів [75]. Текстура визначає видимі властивості поверхні та містить інформацію про її взаємодію зі світлом. Створення 3D-матеріалів і процес текстурування, який полягає в застосуванні матеріалів до моделей і сцен, є ключовим етапом усього процесу роботи з 3D

Текстурування являє собою фундаментальний процес у створенні двомірної й тривимірної графіки, який перетворює базові геометричні форми на візуально багаті та реалістичні об’єкти. За всю історію текстурування було винайдено низку методик і технологій, таких як: методика текстурного відображення поверхонь; візуальний патерн; 2D bitmap-текстура, текстуровані стіни, текстурні карти та UV-розгортки, а також світокарти (light maps) та інше.

До 1974 року об’єкти могли бути встановлені лише в один конкретний колір, і додавання деталей ставало набагато довшим процесом. Все змінилося коли у 1974 році Е. Кетмулл винайшов революційну методику текстурного відображення поверхонь. Він розробив новий алгоритм для рендерингу зображень біваріатних поверхневих патчів з розширеннями в областях симуляції текстур та моделей освітлення [67]. Основна ідея полягала у параметричному відображенні двовимірного зображення на тривимірну поверхню через використання UV-координат.

Практичне застосування цих принципів знайшло своє втілення у розвитку 2D bitmap-текстур для покриття поверхонь, що тісно пов'язано із ранніми відеоіграми, особливо жанру шутерів від першої особи. Класичним прикладом стала гра Wolfenstein 3D (1992), де квадратні текстури 64×64 пікселів створювали ілюзію кам’яних стін, дверей чи металевих поверхонь (див. рис. 2.1). Ці текстури багаторазово повторювались для покриття великих площин, формуючи основу візуального стилю гри [75].



Рисунок 2.1 – Wolfenstein 3D. 1992. Графіка. Ресурс: youtube.com

Doom (1993) розвинув ідею, додавши текстуровані підлогу та стелю, завдяки чому простір виглядав значно реалістичнішим (див. рис 2.2). Підхід працював за принципом texture mapping, де кожен “тексель” (піксель текстури) відповідає точці на поверхні об’єкта.



Рисунок 2.2 – Doom. 1993. Графіка. Ресурс: youtube.com

Проте реалізація була можлива лише завдяки численним оптимізаціям: сцена рендерилась вертикальними колонками пікселів, тригонометричні обчислення замінювались таблицями пошуку, а масштабування текстур виконувалося через повторювані додавання замість складних множень [75].

Такі спрощення (фіксований горизонт, плоска підлога й стеля, відсутність складного освітлення) дозволили створити враження повноцінного 3D без спеціального графічного обладнання. Саме ці технічні хитрощі заклали фундамент майбутніх 3D-рушіїв, де вже з’явилась повноцінна полігональна геометрія та апаратне прискорення.

Подальший прогрес у галузі призвів до появи більш складних систем, де текстурні карти та UV-розгортки поєдналися з інноваційною технологією light maps. Light maps, або карти освітлення, стали важливим доповненням до базових текстур, особливо в ігрових рушіях кінця 1990-х років (див. рис 2.3) Quake (1996) став однією з перших ігор, що широко застосувала цю технологію для створення атмосферного освітлення в тривимірних локаціях [101].



Рисунок 2.3 – Quake. 1996. Графіка. Ресурс: smns-games.com

У Quake освітлення поверхонь задавалося за допомогою спеціальних полів: baselight визначав базовий рівень яскравості, lightmap вказував на карту освітлення, а typelight контролював ефекти, наприклад, пульсуюче світло різної швидкості. Це дозволяло гнучко поєднувати статичне та динамічне освітлення. Текстури ж відображалися через Mip Mapping: для далеких поверхонь

використовувались зменшені версії текстури, що зменшувало «рвані краї» (aliasing).

Таким чином, рушій Quake не лише накладав базові bitmap-текстури, а й поєднував їх із картами освітлення та системою багаторівневого відображення, що значно підвищувало реалістичність графіки порівняно з попередніми іграми, такими як Doom.

Основним же компонентом текстурування будь-якої текстури є UV-mapping – процес створення двовимірних координат (U та V), які визначають відповідність між точками тривимірної моделі та пікселями текстурного зображення (див. рис 2.4). Варто уточнити, що літери U та V, а саме процес текстурування базується на методі проєкції тривимірної поверхні на двовимірну площину. UV-mapping працює як розгортання обгортки цукерки, щоб розкласти її на плоску поверхню [60].

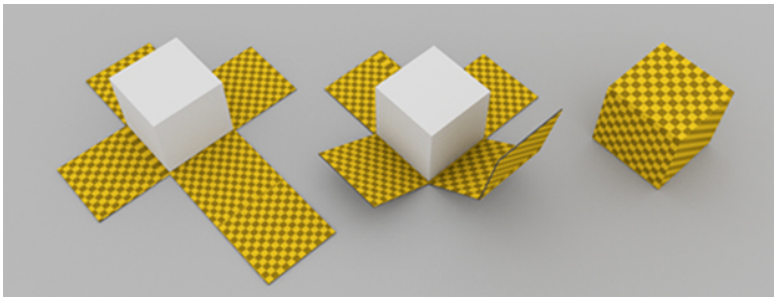


Рисунок 2.4 – UV-mapping. Ресурс: youtube.com

Процес UV-mapping передбачає стратегічне розміщення швів на моделі таким чином, щоб мінімізувати їх видимість та оптимізувати простір для текстур (див. рис. 2.5). Важливо також враховувати деталізацію різних частин моделі: ті області, що вимагають вищої роздільної здатності текстур, повинні отримати більше простору на UV-карті, що дозволяє досягти бажаної деталізації та реалістичності у візуальному представленні персонажа [96].

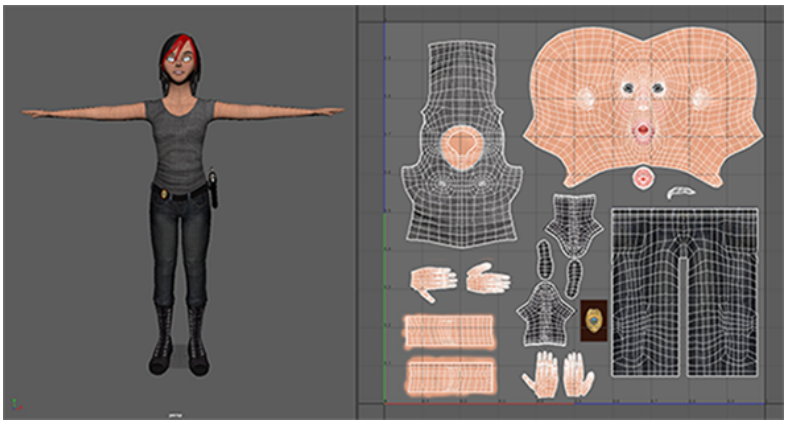


Рисунок 2.5 – UV-розгортка персонажа. Ресурс: youtube.com

Паралельно з розвитком методів створення деталізованих поверхонь виникла потреба в оптимізації продуктивності. MIP-mapping являє собою техніку оптимізації, де Mipmaps та масштабовані версії оригінальних текстур допомагають оптимізувати активи на відстані, зменшуючи використання пам’яті [48].

У рушії Quake (1996) *Mip textures* були реалізовані як окрема структурована система. Кожна текстура зберігалася з кількома рівнями зменшення (1/2, 1/4, 1/8 від оригінального розміру), доступ до яких здійснювався через вказані офсети. Це дозволяло динамічно підвантажувати відповідну версію текстури залежно від відстані до поверхні. Загалом у рівні могло бути до 256 Mip textures, де кожна займала додатково приблизно 33% пам’яті, ніж проста текстура, проте це було ціною на заміну антиаліасингу та плавних переходів між різними масштабами. Додатково певні префікси в назвах текстур визначали їхню поведінку. Так, префікс астерікс «*» позначав анімовані поверхні (наприклад, вода чи лава), а префікс «sky» використовувався для спеціальної обробки неба з ефектом подвійного скролінгу [75].

Фільтрація текстур розвивалась паралельно з MIP-mapping для покращення якості зображення. Білінійна фільтрація використовує інтерполяцію між чотирма найближчими текселями для згладжування текстур [70]. Трилінійна фільтрація розширює цей підхід, додаючи інтерполяцію між

різними MIP-рівнями, що дозволяє уникати різких переходів між рівнями деталізації (див. рис. 2.6).

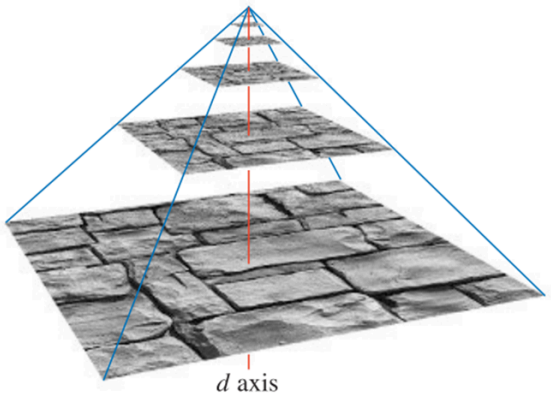


Рисунок 2.6 – Трилінійна фільтрація. Ресурс: slideserve.com

MIP-карта формується шляхом взяття оригінального зображення (рівень – 0) біля основи піраміди та усереднення кожної області 2×2 у значення текселя на наступному рівні вище. Вертикальна вісь d – це третя координата текстури. На цьому рисунку d не є лінійною; це міра того, які два рівні текстури використовує зразок для інтерполяції [45]

Проте обидва методи є ізотропними, тобто однаково обробляють текстури незалежно від кута огляду. Анізотропна фільтрація усуває цей недолік: вона враховує перспективу та кут нахилу поверхні відносно камери, що особливо помітно на дорогах, підлогах чи інших площинах, які розташовані під гострим кутом до спостерігача. У таких випадках, без фільтрації, текстури виглядають розмитими й спотвореними, але з анізотропною фільтрацією вони залишаються чіткими навіть у віддалених точках [48].

Принцип роботи полягає у збільшенні кількості семплів (зразків), які використовуються для відтворення одного текселя. Наприклад, значення *x4* означає чотири семпли на тексель, а *x16* — шістнадцять, що дає максимально чітке відображення текстур на косих поверхнях. Водночас продуктивнісний вплив є відносно невеликим, особливо порівняно з іншими графічними параметрами, як-от якість тіней чи роздільність текстур. Тому більшість

сучасних ігор дозволяють увімкнути анізотропну фільтрацію без значних втрат FPS, а сучасні відеокарти підтримують до *16x AF*, що забезпечує стабільно високу якість зображення [63].

Обмеження полігонального моделювання в контексті деталізації поверхонь стимулювали пошук альтернативних підходів до передачі текстурної інформації через нові карти. У технічному контексті текстури включають спеціальні зображення карти текстур, такі як Diffuse, Normal, Bump, Specular та інші, які проєктуються на поверхню 3D-моделі для збільшення рівня деталізації при збереженні базової геометрії [94]. Такий підхід критично важливий для оптимізації, а розуміння ролі кожної карти текстур та їх комбінацій дуже важливе для створення реалістичних та стилізованих текстур (див. рис. 2.7).

Normal Mapping надає значно більше глибини в текстурі моделі, включаючи освітлення, нерівності та вм’ятини [68]. Даний метод маніпулює відбиттям світла для створення ілюзії дрібних деталей поверхні, нерівностей, канавок, подряпин [83].

При створенні текстур вручну використовується Diffuse Map (Дифузна карта), яка визначає базовий колір та візерунки об’єкта без ефектів освітлення чи затінення [94]. Створення текстур вручну забезпечує високий рівень творчого контролю та свободи, дозволяючи додавати елементи, такі як подряпини чи потертості. Метод особливо цінний для стилізованих проєктів з унікальним художнім стилем [54].

Метод Bump Mapping став першим кроком у цьому напрямку, створений для імітації нерівностей та зморшок на поверхні моделі [27]. Техніка застосовує градації сірого для варіацій висоти та імітації сприйняття глибини [60].

Найбільш радикальним підходом є метод Displacement Mapping, який використовує карти висот для створення тіней та силуетів шляхом зберігання інформації про висоту та модифікації геометрії [54]. Цей метод фізично змінює геометрію моделі для створення реалістичних варіацій поверхні [94].

Методи рельєфного текстурування застосовуються для створення поверхонь із надзвичайною точністю передачі дрібних структур. Їхня головна

особливість полягає у використанні карт високої роздільної здатності, завдяки чому візуалізуються навіть мікроскопічні дефекти – тріщини, нерівності, виступи. Такі підходи особливо актуальні у випадках, коли потрібне наближення збереження реалістичності.

Зазвичай для досягнення цього рівня якості використовують карти від 2K (2048×2048 пікселів) і вище. Це дозволяє зберегти чіткість деталей навіть при наближенні камери. Процес включає нормалізацію векторних складових, що забезпечує правильне відображення світла й тіней на поверхні.

Концептуальний прорив у розумінні взаємодії світла з матеріалами знайшов своє втілення у Physically Based Rendering (PBR), яке охоплює набір технік Physically Based Shading, що імітують взаємодію світла з поверхнями відповідно до фізики реального світу [54]. У PBR металева текстура включає не лише візуальний вигляд, але й фізичні властивості, гладкість, шорсткість, відбивну здатність.

Модель Disney BRDF була представлена Б. Берлі (Brent Burley) на SIGGRAPH 2012 як частина курсу з фізично обґрунтованого шейдингу [53]. Ця модель стала революційною через свій баланс між фізичною точністю та художньою гнучкістю. Disney BRDF використовує інтуїтивно зрозумілі параметри замість фізичних величин, що робить її доступнішою для художників. Модель включає 11 параметрів, серед яких baseColor, metallic, roughness, які стали стандартом індустрії. Важливо, що модель може відтворити широкий спектр матеріалів з вимірювальної бази даних MERL, використовуючи лише один колірний параметр та десять скалярних параметрів [53].

Метод PBR використовує спеціалізовані карти для досягнення максимального реалізму [70]. Albedo Map замінила традиційну Diffuse Map, представляючи чистий колір поверхні без будь-якого освітлення чи затінення. Albedo Map – це карта, яка визначає базовий колір поверхні об’єкта без будь-якого впливу освітлення, тіней чи відбиттів. Вона містить лише чисті кольорові значення, що дозволяє фізично коректно обчислювати освітлення та тіні під час рендерингу. Традиційно Diffuse Map включала не тільки кольори,

але й попередньо обчислені ефекти освітлення та тіней (наприклад, Ambient Occlusion). Це могло призводити до неточностей при використанні в сучасних PBR-робочих процесах, де важливо мати чисті кольорові дані без попередніх коригувань [95].

Ambient Occlusion Map – це текстура, яка визначає, скільки навколишнього світла може досягти кожної точки на поверхні об’єкта. Вона створює ефект м’яких тіней в тих місцях, де поверхні знаходяться близько одна до одної або в затінених ділянках, таких як кути, тріщини чи стики. Це додає відчуття об’єму та глибини, що особливо важливо в реалістичному рендерингу.

В рамках PBR (Physically Based Rendering) робочого процесу, AO Map зазвичай використовується як окрема текстура. Вона може бути комбінована з іншими картами, такими як Metallic та Roughness, для створення більш детальних матеріалів. Roughness Map визначає, наскільки відбивною або матовою виглядає поверхня [54]. Metalness Map розрізняє металеві та неметалеві поверхні, впливаючи на характер відбиття світла. Однак AO Map не є замінювачем фізичного освітлення сцени, вона лише доповнює його для досягнення бажаного ефекту [60].

Головною перевагою PBR-текстур є їх здатність імітувати взаємодію світла з реальними матеріалами [25]. Створена за принципами PBR текстура коректно виглядатиме в будь-яких умовах освітлення, що робить цю технологію незамінною для ігор та інтерактивних додатків з динамічним освітленням.

Автоматизація трудомістких процесів створення текстур стала можливою завдяки розвитку алгоритмічних підходів, яскравим представником яких є процедурне текстурування Allegorithmic. Процедурна текстура, порівняно з 3D-скануванням створюється за допомогою математичного опису, такого як алгоритм, а не безпосередньо зі сканованих даних [29]. Переваги методу включають дешеві витрати на зберігання, необмежену роздільну здатність текстури та просте відображення текстур. Техніки процедурного текстурування, застосовуючи розумні алгоритми, автоматизують часомісткі етапи [32].

Компанія Allegorithmic, заснована у 2003 році С. Дегі у Франції, стала піонером у розробці процедурних інструментів текстурування. У 2019 році Adobe придбала Allegorithmic за $106.5 мільйонів [46]. До моменту придбання, інструменти Substance використовувалися більш ніж 95% AAA ігрових студій [74].

Процедурні текстури створюють складні для ручного виготовлення матеріали шляхом застосування алгоритмів та математичних функцій [25]. Техніка часто використовується у відеоіграх та 3D-анімації для створення природних матеріалів. Алгоритми шуму створюють органічні патерни, фрактальні функції генерують деталізовані поверхні каменю, а математичні формули імітують структуру деревини [54].

Альтернативний вектор розвитку, орієнтований на максимальний реалізм, знайшов реалізацію в технологіях цифрового сканування матеріалів Quixel Megascans, яка представляє собою найбільшу у світі бібліотеку відсканованих активів для розробки ігор та візуальних ефектів [6]. Epic Games придбала Quixel у 2019 році, зробивши Megascans безкоштовними для користувачів Unreal Engine [63].

Метод сканування або фотограмметрії порівняно з «малюванням» дозволяє перенести реальні матеріали в цифровий простір через записування зображень потрібної поверхні [47]. Використання фотографій для створення текстур, відоме як «image-based texturing», дозволяє відтворити природні матеріали, такі як камінь, метал та дерево [25].

Серед переваг фотограмметрії варто виділити високу роздільну здатність текстури 3D-моделей, що може бути використана для відображення дрібних деталей. Лазерне сканування дає точну та детальну геометрію об’єкта, в той час, як фотограмметрія, з її високою роздільною здатністю може допомогти детально відобразити текстуру об’єкта [91].

Процес 3D-сканування/фотограмметрії включає наступні етапи: *фотозйомка об’єкта.* (Об’єкт фотографується з багатьох кутів (зазвичай 50-200 знімків) з перекриттям 60-80% між сусідніми кадрами) [99]; *обробка в*

спеціалізованому ПЗ (Програми як Agisoft Metashape, Reality Capture або Meshroom аналізують знімки через алгоритми Structure from Motion (SfM), знаходять спільні точки між фотографіями та будують щільну хмару точок); *створення полігональної сітки* (З хмари точок генерується високополігональна модель (часто понад 10 мільйонів полігонів) через алгоритми тріангуляції Delone або Poisson Surface Reconstruction); *генерація текстур* (проєктування оригінальних фотографій на створену геометрію, використовуючи техніки blending та color correction для створення безшовних текстурних карт. Роздільність може досягати 16K для детальних об’єктів); *оптимізація та створення PBR-карт* (Модель проходить через процес ретопології для створення low-poly версії. Деталі запікаються в карти нормалей, displacement та AO. Спеціалізовані алгоритми або ручна обробка створюють карти roughness та metalness на основі аналізу поверхні); *Delighting* (Видалення інформації про освітлення з albedo текстур для отримання чистого кольору матеріалу, що критично важливо для коректної роботи в PBR-pipeline) [78].

Сучасна епоха візуалізації в реальному часі ознаменувалась впровадженням революційних технологій в Unreal Engine 5. Багаторічні дослідження у галузі комп'ютерної графіки матеріалізувались у формі передових технологій реального часу Real-time Ray Tracing і технології Nanite + Lumen. Nanite - це нова віртуалізована геометрична система, яка використовує новий внутрішній формат сітки та технологію рендерингу для відтворення деталей у масштабі пікселів [89]. Nanite використовує технологію віртуалізованої мікрополігональної геометрії, яка дозволяє движку працювати з моделями, що містять мільярди полігонів [99]. Lumen - це повністю динамічна система глобального освітлення та відбиття, яка служить системою освітлення за замовчуванням в Unreal Engine 5 [93]. Система використовує гібридний підхід [78]. Основною метою Lumen є підтримка великих відкритих світів, що працюють зі швидкістю 60 кадрів на секунду на консолях наступного покоління [99].

Real-time Ray Tracing, підтримуваний сучасними GPU через технології NVIDIA RTX та AMD Ray Accelerator, дозволяє обчислювати фізично коректні тіні, відбиття та глобальне освітлення в реальному часі [94].

У створенні текстур для 3D-об’єктів використовують кілька основних методів: *ручне малювання*, яке дозволяє детально контролювати кожен аспект; *процедурну генерацію*, що залучає алгоритми для автоматизації часомістких процесів та *сканування реальних поверхонь* для досягнення точного реалізму. Текстури поділяються на унікальні, створені для конкретної моделі, та мозаїчні (повторювальні) [47].

Техніка «малювання» текстур передбачає безпосереднє створення зображень у спеціалізованому програмному забезпеченні [91]. Процес включає малювання текстур безпосередньо на 3D-моделі, використовуючи 2D-програмне забезпечення [25].

Особливим випадком стали спеціалізовані методи текстурування волосся. Створення кожної окремої волосини було надзвичайно ресурсозатратним процесом, тому було вирішено використовувати технологію «alpha map» (карти прозорості) [73]. Alpha mapping для прозорих ефектів використовувався з ранніх етапів розвитку комп’ютерної графіки [45]. Зараз же використання «spline modelling» дозволяє створювати складні органічні форми на кшталт волосся.

Еволюція технологій текстурування демонструє послідовний перехід від простих методів накладання двовимірних зображень на тривимірні поверхні до складних систем фізично обґрунтованого рендерингу. Починаючи з піонерської роботи Е. Кетмулла у 1974 році, галузь пройшла шлях від базового Texture Mapping [55] через Bitmap-текстури ранніх ігор до сучасних PBR-workflow із підтримкою Real-time Ray Tracing.

Сучасне текстурування характеризується синтезом усіх накопичених технологій. Художники можуть поєднувати ручне створення, процедурну генерацію та сканування реальних матеріалів, досягаючи неперевершеного рівня візуальної достовірності при збереженні інтерактивної продуктивності. Перспективи подальшого розвитку пов'язані з удосконаленням машинного

навчання для автоматизації створення контенту та подальшою інтеграцією фізично точних методів освітлення в real-time додатки.

Текстурування – це метод, який використовується для надання тривимірним об’єктам реалістичного вигляду та високого рівня деталізації. Замість збільшення кількості полігонів у моделі, застосовуються спеціальні зображення (текстури), що імітують поверхневі властивості матеріалів: деревини, металу, тканини, каменю, шкіри тощо. Такий підхід дозволяє значно зменшити обчислювальні витрати водночас забезпечити правдоподібність зображення.

Використання текстур дозволяє ефективно відтворювати дрібні деталі без суттєвого збільшення розміру файлів. Це особливо актуально в ігровій індустрії та інтерактивних симуляціях, де швидкість обробки кадрів є критично важливою. Однією з переваг є можливість змінювати роздільну здатність текстур залежно від відстані перегляду: на далеких планах застосовуються менш якісні карти, тоді як для об’єктів крупного плану – високодеталізовані. Це дозволяє зберігати баланс між продуктивністю та якістю відображення [51].

У сучасних графічних рушіях текстури виконують не лише декоративну функцію. Вони застосовуються для створення карт нормалей, висот, відбиттів, що впливають на освітлення, глибину та сприйняття матеріалу. Завдяки цьому можна імітувати властивості різних поверхонь – від блиску металу до м’якої структури тканини. Динамічні текстури змінюються в реальному часі, наприклад, для відображення процесів старіння, забруднення або зміни погодних умов.

Особливий інтерес становить багатошарове текстурування, яке передбачає комбінування кількох карт для однієї поверхні. Така технологія дозволяє досягти високої складності візуальних ефектів. Наприклад, поєднання базової металевої текстури з накладеною іржею чи пилом створює відчуття природного зносу матеріалу.

Текстурування високої деталізації є ключовим інструментом у створенні реалістичної графіки та складних поверхонь у різних сферах цифрових медіа.

У світі відеоігор, особливо з відкритими світами, як The Witcher 3: Wild Hunt або Red Dead Redemption 2, цей метод дозволяє надати ландшафтам неймовірну реалістичність. Кожен камінь, листок або травинка відображаються із власною текстурою високої роздільної здатності. Для цього використовують карти нормалей, карти висоти та displacement mapping, що створюють відчуття об’ємності без додаткових полігонів.

У сучасних RPG та науково-фантастичних іграх, наприклад Cyberpunk 2077, детальні текстури застосовуються для персонажів. Шкіра, шрами, татуювання та ознаки старіння опрацьовуються за допомогою normal і displacement mapping, надаючи героям життєвості та глибини.

У кінематографі високодеталізоване текстурування допомагає оживити фантастичні світи та персонажів. У Avatar та The Lord of the Rings кожен елемент – шкіра, тканина, камінь – має деталізовану структуру. Displacement maps в Avatar забезпечували реалістичну поверхню облич і органічних об’єктів. Для великих сцен, як в Interstellar або Gravity, текстури високої роздільності допомагають пророблять деталі космічних об’єктів та ландшафтів.

В архітектурній візуалізації детальні текстури роблять зображення будівель максимально природними. Поверхні стін, підлоги, меблі та зовнішні елементи (дерево, метал, плитка) відображаються з високою точністю, а карти висоти та нормалей створюють відчуття реальної фактури матеріалів, таких як мармур, бетон чи скло.

Проте, методи високодеталізованого текстурування мають обмеження. Бамп-маппінг імітує рельєф, не змінюючи геометрію, тоді як нормальні карти покращують освітлення та глибину, але теж не впливають на форму. Displacement mapping додає об’єму, проте сильно навантажує процесор та GPU. Parallax mapping створює ефект глибини, але при певних ракурсах можуть з’являтися артефакти. Використання кількох шарів текстур збільшує витрати пам’яті, що стає проблемою для слабших пристроїв. PBR-текстурування забезпечує максимально реалістичні матеріали, але потребує точних даних та

ресурсів, що обмежує продуктивність у реальному часі на менш потужних системах [80].

Таким чином, вдосконалення високодеталізованого текстурування поєднує оптимізацію існуючих технік і впровадження новітніх технологій. Це забезпечує створення фотореалістичних сцен у відеоіграх, кіно, архітектурній та продуктовій візуалізації, одночасно зберігаючи продуктивність і ефективність системи.

2.2 Особливості технічної реалізації текстурування в програмних засобах

Процес створення персонажа є комплексним і багатогранним, що включає кілька послідовних етапів, кожен з яких сприяє формуванню продуманого та привабливого образу. Хоча основні кроки залишаються подібними у більшості проєктів, специфіка їх реалізації може значно відрізнятися залежно від жанру, формату медіа та завдань конкретного проєкту. Нижче представлено детальний опис основних етапів процесу: концептуалізація, моделювання, ліплення, ретопологія, UV-розгортка, текстурування, ріггінг, анімація, рендеринг.

На початковому етапі проводиться концептуалізація, важливо сформувати загальне уявлення про персонажа. Це передбачає візуалізацію основних рис та пропорцій, які будуть керувати подальшим процесом моделювання. Можна створити ескіз вручну або за допомогою програмного забезпечення для 3D-моделювання. У разі відсутності досвіду малювання або чіткого уявлення про персонажа рекомендується використовувати інструменти генерації штучного інтелекту, наприклад Meshy, які дозволяють отримати первинні ідеї за допомогою текстового опису.

Після визначення базової концепції починається процес створення 3D-моделі. На цьому етапі формується базова структура персонажа — «сітка», що включає контури обличчя, тіла та скелета. Моделювання зазвичай розпочинається з простих форм, які поступово уточнюються з додаванням

деталей. Знання анатомії значно спрощує цей процес та підвищує реалістичність результату.

За допомогою інструментів цифрового ліплення, таких як Blender або ZBrush, додаються деталі обличчя, мускулатури та інші риси, що роблять модель більш живою та виразною. Ретопологія полягає у впорядкуванні топології сітки – вершин, ребер та граней – для оптимізації моделі. Цей етап підвищує ефективність анімації та рендерингу, особливо в контексті розробки ігор, де складна геометрія може призводити до затримок.

Перед текстуруванням створюється 2D-представлення моделі, що дозволяє правильно накладати текстури на поверхню персонажа. UV-розгортка забезпечує точне розташування матеріалів, таких як шкіра або елементи одягу, відповідно до контурів моделі. На цьому етапі додаються матеріали, кольори та візерунки, що надають моделі реалістичності та завершеного вигляду. Незалежно від якості моделі, текстурування є необхідним кроком для досягнення високого рівня деталізації. Ріггінг передбачає створення скелетної структури моделі, яка дозволяє їй рухатися. Цей процес є основою для подальшої анімації та забезпечує реалістичність рухів персонажа.

Анімація реалізує рух персонажа через послідовність зображень. Використовуючи ріг, створюються рухи, що відображають ходьбу, стрибки або емоційні реакції персонажа, що дозволяє досягти максимальної правдоподібності. Заключний етап передбачає використання освітлення та ефектів навколишнього середовища для отримання високоякісного зображення або відео персонажа, завершуючи процес створення 3D-моделі.

Для професійної роботи з текстурами існують спеціалізовані програмні рішення, що дозволяють створювати, редагувати та оптимізувати матеріали для різноманітних цифрових проєктів від ігор і анімації до візуалізацій архітектури та дизайну. Сучасні додатки пропонують широкий спектр функцій та інструментів і орієнтовані на різні потреби користувачів: від швидкого генератора текстур до глибокої процедурної роботи зі складними матеріалами. Тому важливо ознайомитися з найпоширенішими програмами, які

використовуються у професійній практиці, а також з ресурсами в інтернеті, де можна знайти готові текстури та матеріали для роботи. Спершу розглянемо самі додатки, а потім перейдемо до онлайн-ресурсів.

Одним із провідних інструментів вважається Substance Painter (див. рис. 2.7). Він забезпечує роботу з різними типами карт, підтримує «розумні» матеріали, що автоматично адаптуються до форми моделі, а також дозволяє художнику вносити зміни у режимі реального часу. Інтеграція з іншими популярними програмами (Maya, 3ds Max) робить його універсальним інструментом для індустрії.

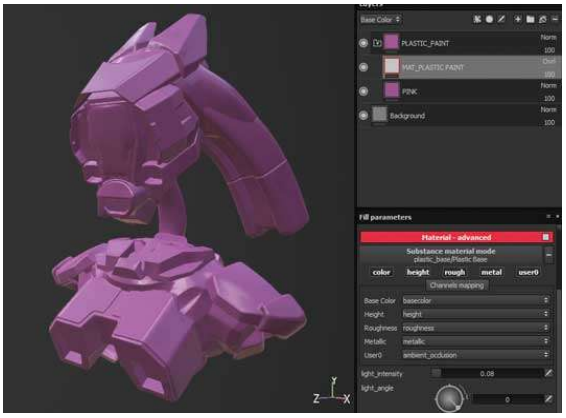


Рисунок 2.7 – Substance Painter. Ресурс: [3das.com.ua](3das.com.ua)

Власне текстурування об’єкта відбувається через спеціальну панель інструментів, де художник обирає матеріали та карти (кольорові, нормалей, блиску тощо) і накладає їх на поверхню моделі. Програма дозволяє регулювати властивості текстур, такі як колір, прозорість, відбивання чи шорсткість, а також застосовувати «розумні» маски й ефекти, що автоматично підлаштовуються під форму об’єкта. У режимі реального часу можна бачити, як зміни впливають на модель, і коригувати їх до досягнення бажаного вигляду, що робить процес інтуїтивним і гнучким.

Adobe Photoshop дозволяє не лише накладати готові текстури на об’єкти, але й створювати власні з нуля. Можливість створення безшовних текстур, ідеально підходять для повторюваних поверхонь у 3D-моделюванні або ігровій

графіці. Особливість безшовної текстури полягає в тому, що вона може повторюватися по горизонталі та вертикалі без помітних стиків. Коли така текстура тайлиться на 3D-модель або площину, межі між копіями зображення не видно — перехід виглядає плавним і природним. Це досягається завдяки спеціальній обробці країв текстури, коли ліва й права, а також верхня й нижня частини логічно продовжують одна одну. Завдяки цьому поверхня не виглядає «порізаною» на квадрати й не привертає увагу повторюваністю. Паттерн може бути як простим (геометричні форми, орнаменти, декоративні мотиви), так і складним (структура каменю, подряпини на металі, тканинне плетення). Головна вимога до нього — узгодженість країв, щоб при повторенні не виникало різких переходів або візуальних «швів»

У Adobe Photoshop створення текстури починається з підготовки полотна та базового фону, після чого художник накладає шари з різними елементами, такими як кольори, візерунки, градієнти чи фотографічні зображення. За допомогою кистей, фільтрів, режимів накладання та масок можна додавати деталі, текстурні ефекти та глибину поверхні. Після цього шари об’єднуються та коригуються, щоб отримати цілісну текстуру, яка готова для подальшого експорту у готовий патерн для подальшого використання за текстуруванням поверхонь. Подібно плитки, прямокутні патерни вкладаються один до одного перекриваючи поверхні будь-якого розміру.

Можливості текстурування представлені у відкритій й безплатній програмі – Blender, яка розроблена для створення тривимірної графіки [51]. Вона дозволяє працювати з різними видами карт, виконувати малювання текстур прямо по 3D-моделі, застосовувати PBR-матеріали для досягнення максимальної реалістичності (див. рис. 2.8). Великим плюсом є підтримка UV-розгорток, що дозволяє точно керувати проєкцією текстур [99]. Система вузлів у Blender відкриває шлях до створення процедурних матеріалів та складних візуальних ефектів. Поєднання безкоштовності й потужного функціоналу робить програму зручною як для новачків, так і для професійних митців.

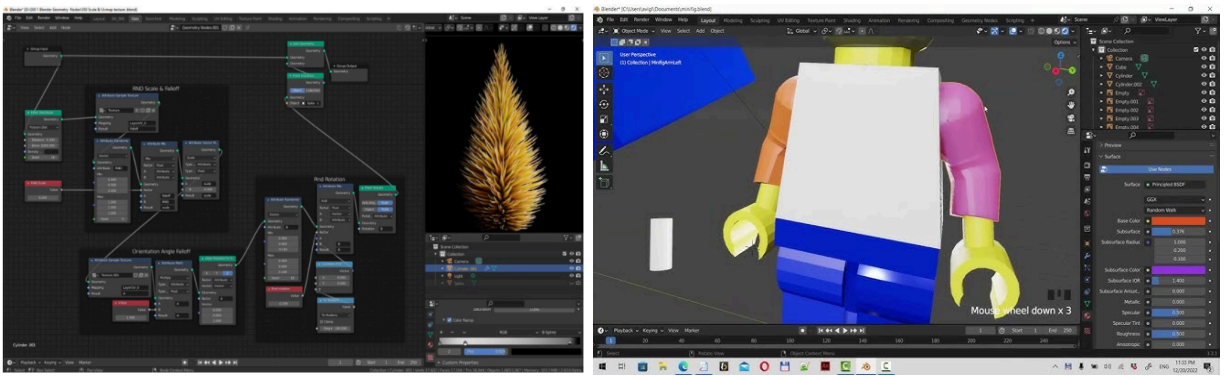


Рисунок 2.8 – Текстурування в Blender. Ресурс: youtube.com

У Blender текстурування об’єкта відбувається через редактор матеріалів, де художник призначає на поверхню різні карти – кольорову, нормалей, шорсткості тощо – за допомогою вузлової системи (Node Editor). Текстури можна поєднувати, змішувати та коригувати властивості матеріалів у режимі реального часу, бачачи результат на моделі [51]. Додатково Blender дозволяє малювати безпосередньо по 3D-моделі (Texture Paint), створювати безшовні текстури та застосовувати маски й ефекти, що автоматично підлаштовуються під форму об’єкта, що робить процес гнучким і контрольованим.

Інструмент професійного рівня Mari (розробка компанії Foundry), який широко застосовується у виробництві кіно та спецефектів (див. рис. 2.9). Його основна сила полягає у роботі з текстурами надвисокої роздільної здатності та підтримці багатьох UV-розгорток для складних моделей [60].

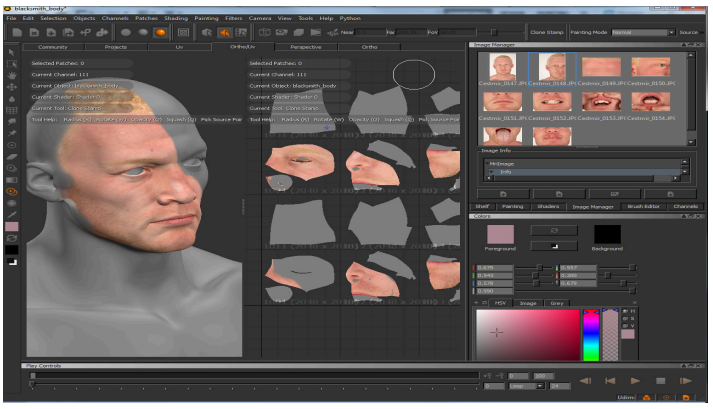


Рисунок 2.9 – Текстурування в Mari. Ресурс: audiovisual451.com

Mari дає змогу створювати багатошарові матеріали з використанням масок, що забезпечує художнику гнучкість і контроль [45]. Завдяки цьому програму часто обирають для масштабних і високоякісних проєктів, де важлива максимальна деталізація поверхонь.

У Mari процес текстурування об’єкта відбувається через роботу з високодеталізованими 3D-моделями, де художник накладає різні карти – кольорів, нормалей, шорсткості та інші – за допомогою спеціальних інструментів і багатошарових пензлів. Програма підтримує роботу з великими роздільними текстурами та дозволяє створювати безшовні й детальні матеріали, комбінуючи їх із масками та ефектами, що автоматично адаптуються до форми моделі. У режимі реального часу можна бачити результат на моделі, коригувати деталі та досягати максимально реалістичного вигляду поверхні.

Суттєву допомогу художникам забезпечують і спеціалізовані ресурси з текстурами: Textures.com, Poliigon, CC0 Textures, HDRI Haven та інші

Однією з найпопулярніших сервісів, що надає величезну базу безоплатних та преміальних матеріалів є Textures.com (див. рис. 2.10). Textures.com – це онлайн-каталог текстур, який дозволяє легко знаходити та переглядати матеріали для 3D-моделей, графіки та дизайну [80]. На сайті зручна панель ліворуч, де представлено список тематичних категорій; обравши певну тему, користувач отримує доступ до великого набору зразків текстур у відповідній категорії. Кожна текстура доступна у різних роздільних здатностях, що робить сайт корисним як для професіоналів, так і для аматорів, які потребують готових матеріалів для своїх проєктів.

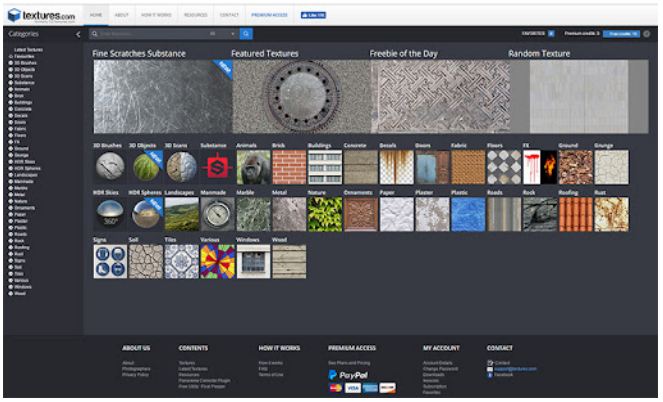


Рисунок 2.10 – Textures.com. Веб-ресурс

У каталозі можна знайти текстури практично будь-якого типу: від дерева й каменю до металів і тканин. Сайт підтримує різні роздільні здатності, що дозволяє підібрати матеріали під конкретні завдання – від невеликих проєктів до високоякісних візуалізацій.

Ще однією платформою з колекцією високоякісних текстур і матеріалів для 3D-графіки є Poliigon (див. рис. 2.11.) [67]. Хоча більшість контенту є платним, користувачам доступні й безплатні ресурси.

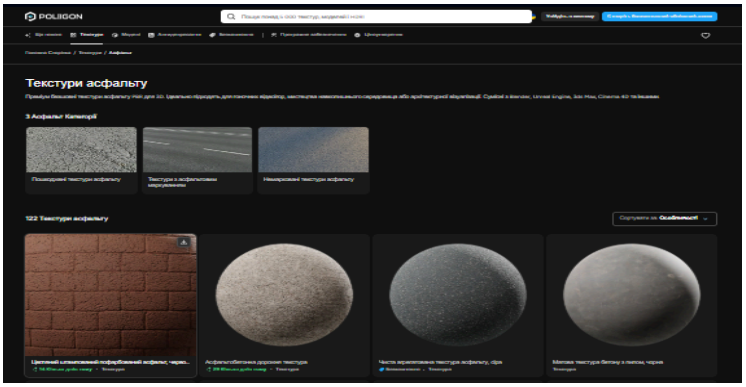


Рисунок 2.11 – Poliigon. Веб-ресурс

На сайті Poliigon обираючи розділ «Текстури», користувач може зі списку вибрати певну тему, після чого з’являється набір зразків текстурованих об’єктів, наприклад куль. Наведення курсора на кулю дозволяє переглянути власне безшовну текстуру, що дає змогу швидко оцінити матеріал перед завантаженням або використанням у проєкті.

Перевагою Poliigon є підтримка багатьох форматів і гнучкість у виборі роздільної здатності, що робить матеріали універсальними для використання в різних програмах [52]. Колекція ресурсу орієнтована на різні галузі – від архітектурних рендерів до геймдеву та анімацій. Висока деталізація та широка тематика бібліотеки роблять Poliigon одним із найцінніших джерел для художників, яким потрібні реалістичні матеріали у своїх роботах [88].

CC0 Textures вирізняється тим, що всі матеріали на сайті доступні без жодних обмежень завдяки ліцензії Creative Commons Zero (CC0) (див. рис. 2.12) [51]. Це означає, що будь-які текстури можна застосовувати як у приватних, так і у комерційних проєктах без необхідності вказувати автора.

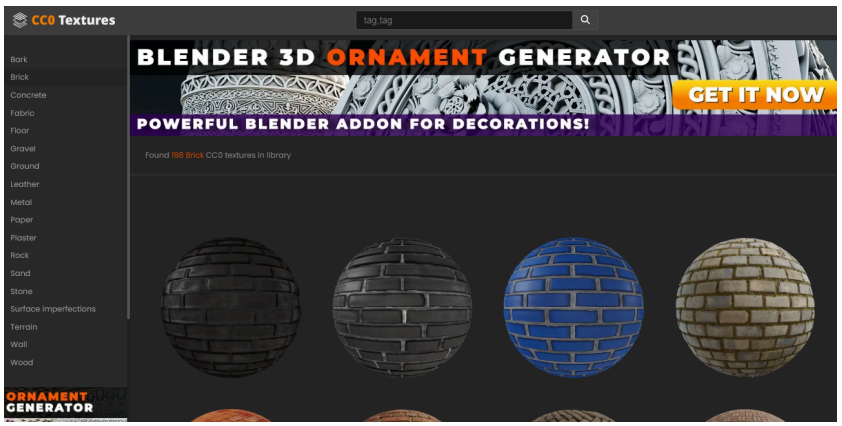


Рисунок 2.12 – CC0 Textures. Веб-ресурс

У бібліотеці зібрані різні категорії – дерево, камінь, метал, тканини та багато інших, причому файли доступні у декількох роздільних здатностях. Завдяки цьому CC0 Textures підходить як для простих, так і для масштабних візуалізацій.

HDRI Haven спеціалізується на поширенні безплатних HDRI-карт, які використовуються для освітлення та формування відбиттів у 3D-сценах. Ресурс пропонує колекцію карт із різними умовами освітлення: від природного денного чи нічного до студійного. Всі HDRI доступні у високій якості та різних розмірах, що дозволяє застосовувати їх у проєктах будь-якої складності. Завдяки

реалістичності й відкритому доступу, HDRI Haven став важливим інструментом для дизайнерів, аніматорів і візуалізаторів (див. рис. 2.13).

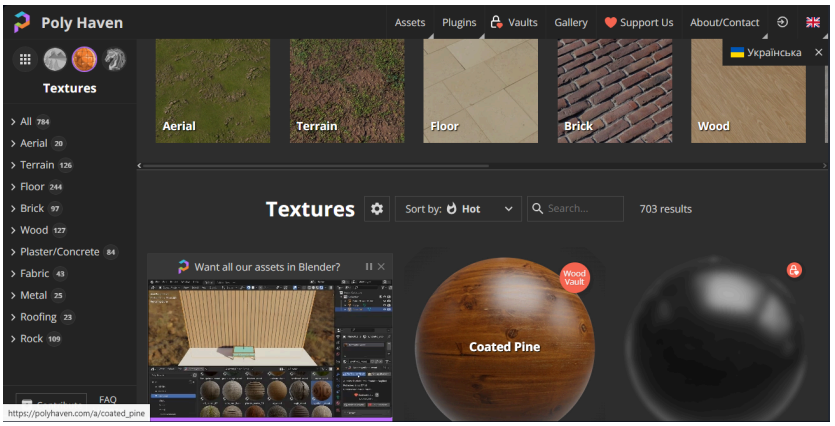


Рисунок 2.13 – HDRI Haven. Poly Haven. Веб-ресурс

HDRI Haven спеціалізується на поширенні безплатних HDRI-карт, які використовуються для освітлення та формування відбиттів у 3D-сценах. Ресурс пропонує колекцію карт із різними умовами освітлення: від природного денного чи нічного до студійного. Всі HDRI доступні у високій якості та різних розмірах, що дозволяє застосовувати їх у проєктах будь-якої складності. На відміну від звичайних текстурних ресурсів, HDRI Haven дозволяє не лише покривати об’єкти текстурами, а й створювати реалістичне оточення та освітлення сцени, забезпечуючи природні відбитки та тіні. Крім того, ресурс підтримує інтеграцію з різними 3D-пакетами, надає панорамні прев’ю карт і полегшує вибір потрібної HDRI завдяки зручній класифікації за типом освітлення та атмосферою, що робить його незамінним інструментом для дизайнерів, аніматорів і візуалізаторів.

У сучасних програмних засобах для комп’ютерної графіки текстурування відіграє ключову роль у створенні реалістичного вигляду об’єктів. Спрощена технічна реалізація текстур передбачає використання базових методів, що дозволяють швидко накладати зображення на поверхню об’єкта без значних витрат обчислювальних ресурсів.

Найпоширенішим підходом є застосування растрових (2D) текстур, які являють собою двовимірні зображення, накладені на полігони 3D-моделі. Для спрощення реалізації часто використовуються наступні технічні методи:

1. Координати текстур (UV mapping) – об’єкт «розгортається» на площину, після чого пікселі з текстури прив’язуються до вершин і поверхонь моделі. У спрощеному варіанті використовують стандартні розгортки, що дозволяють уникнути складного ручного налаштування UV-карт;

2. Пряме накладання текстури (simple mapping) – текстура наноситься без складних алгоритмів фільтрації та без обробки освітлення. Цей метод підходить для прототипів або додатків, де продуктивність важливіша за реалістичність;

3. Використання тайлів (tiling textures) – повторення одного невеликого зображення на великій площі поверхні дозволяє зменшити обсяг пам’яті та спростити створення великих текстурованих сцен;

4. Базова фільтрація текстур – при спрощеній реалізації застосовується мінімальна або відсутня фільтрація (наприклад, nearest-neighbor), що прискорює рендеринг за рахунок меншої точності текстури;

Крім того, для спрощеного створення текстур часто застосовуються генеративні або процедурні методи, наприклад, створення патернів або шумів (Perlin noise), що дозволяє автоматично генерувати текстури без необхідності малювати їх вручну. Це значно знижує трудомісткість розробки та зменшує потребу в ресурсах.

Спрощена технічна реалізація текстур у програмних засобах дозволяє швидко створювати візуально прийнятні поверхні об’єктів, зберігаючи баланс між продуктивністю і якістю зображення, що особливо актуально при розробці навчальних або прототипних 3D-сцен.

2.3 Аналіз текстурованих 3D персонажів

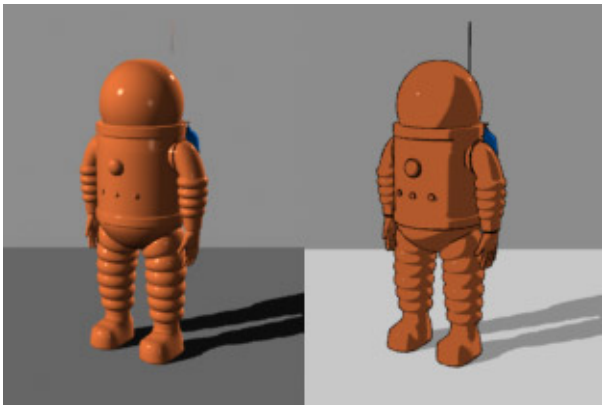
Сучасна індустрія цифрової анімації та відеоігор демонструє парадоксальну тенденцію: технологічний прогрес у галузі тривимірної графіки призводить не до тотального домінування фотореалістичного рендерингу, а до ренесансу стилізованих підходів, що свідомо імітують двовимірну естетику.

Метою такої стилізації є передача глядачеві ефекту ілюстрації чи коміксу (наприклад, накладення хетчингу, обводок) через тривимірний контент. Основою для такого підходу стає нефотореалістичний рендеринг (NPR), який охоплює різні техніки, зокрема cel-shading, які підкреслюють контраст і лінійність. Контурне тонування (cel-shading) являє собою метод нефотореалістичного рендерингу (NPR), що має на меті створити враження, ніби комп'ютерна графіка була намальована від руки [66]. Рушій вибирає кілька чітких відтінків кольорів і грубо розмежовує світло та тіні, надаючи сцені «плоскокутового» вигляду. Принципи текстурування та рендерингу у стилі cel-shading дозволяють отримати графіку, схожу на класичну анімацію, використовуючи сучасні технічні засоби.

На відміну від традиційного фотореалістичного освітлення, стилізоване освітлення (stylized lighting) дає художнику більший контроль над настроєм сцени, дозволяючи підкреслити ключові моменти та створити впізнавану візуальну ідентичність. Наприклад, світлові промені можуть бути пофарбовані в нетрадиційні кольори, або можна спеціально формувати тіні, об'єднуючи елементи сцени в художньо цілісну композицію [41].

Усі методи базуються на текстуруванні та матеріалах. Зокрема, текстурні карти задають базові кольори та інформацію про поверхню. Мапи нормалей («normal maps») широко використовуються для імітації дрібних нерівностей та деталей (подряпини, зморшки) без додаткових полігонів [87].

Класична техніка toon-shading забезпечує «комікcний» вигляд. Модель рендериться з обмеженою кількістю відтінків (звичайно 2–3 рівні світла), а контури можуть підкреслюватися окремим шейдером (див. рис. 2.14).



а *б*

Рисунок 2.14 – Текстурування: а – plastic shader, б – toon-shading. Ресурс: tropedia.fandom.com

Така техніка робить форми виразними та виступає більше як нефотореалістична візуалізація, але вимагає спеціальних шейдерів чи нодового налаштування матеріалу (в Blender, Maya, 3ds Max або ігрових рушіях) для отримання необхідного вигляду. Сучасні пакети (Blender, Maya, Unreal Engine тощо) підтримують візуальні редактори шейдерів (node-based materials) та власні мови HLSL/GLSL для кастомізації. Такий функціонал дозволяє гнучко комбінувати текстури, кольори, градієнти та освітлення. Наприклад, можна створювати процедурні маски для обводки або побудувати складний алгоритм затінення, що імітує малюнок (outline) на основі куту між вектором нормалі та камерою. Доступ до таких інструментів означає, що художник може експериментувати з унікальними look-дизайнами без глибокого програмування.

Ручне текстурування (hand-painted textures). Замість фотореалістичного PBR-підходу тут застосовують дифузну карту з розписом пензлем і більше не використовують автоматичні карти Roughness чи Specular. Як зазначає один із художників, у такому підході «використовується карта альбедо; усі інші карти ПБР нівелюються, а ефекти навколишнього освітлення створюються в текстурі вручну». Художники розписують текстури у 2D-редакторах, створюючи дифузні мапи, а потім заздалегідь запікають або малюють основні тіні/оклюзії. Самі

шейдери часто стають простими «матеріалами за замовчуванням» з одним дифузом: «вся суть методу полягає у звичайному матеріалі з дифузною текстурою; основна робота виконується у Photoshop (інколи 3DCoat)… усе інше є простим малюнком» [51].

Однак досягти деяких стилізованих тіней за допомогою ручної намальованої розсіяної тіні практично неможливо. Наприклад, тіні під руками або шиєю деяких персонажів, на швах та складках одягу, або ті, що створюють той фірмовий ефект затінення волосся. Багато з таких тіней також створюють ефект навколишнього простору. Вони не відображаються в режимі реального часу, а промальовуються в саму текстуру [69].

У сучасній індустрії анімації все частіше застосовують гібридні підходи, які поєднують 2D-ілюстрації з 3D-сценами. Так, серіал Arcane багато глядачів залишив із думкою «така графіка є 3D, але ніби не 3D»: серіал дійсно «перетворює кадри на живу картину», поєднуючи глибину реалістичного 3D з художньою стилізацією малюнка [97]. Весь вигляд серіалу будувався навколо відчуття «малюнку живою фарбою» (див. рис. 2.15). Завдяки унікальному поєднанню шарів (розписок, композитингу 2D-ефектів, мультикадрової анімації) художники забезпечили неймовірну деталізацію й цілісність сцени. Сюжетна глибина та сміливий стиль зробили серіал хітом стрімінгу, піднявши планку інтеграції 2D і 3D-елементів у анімації.



Рисунок 2.15 – Arcane. Jinx. Текстури на моделі. Ресурс: deviantart.com

Fortiche використовували стандартний пакет Autodesk Maya для моделювання, риггінгу та анімації; Adobe Photoshop для розпису текстур; композицію здійснювали у Nuke (змішування 2D/3D-шарів) та Adobe After Effects (для інтеграції 2D-ефектів). Було також розроблено низку власних інструментів: спеціальні шейдери для об'єднання ручного малюнка з 3D-моделлю, кастомні камери й менеджер активів для оптимізації роботи. У проєкті переважала ручна розписка («painterly») усі поверхні буквально «намальовані» як в олійному живописі. Відблиски та тіні не завжди обчислювалися автоматично; навпаки, художники прямо наносили їх на текстури (тобто рисували світлотінь вручну) [68].

Для мультфільму Spider-Man: Into/Across the Spider-Verse (Sony Imageworks) впровадили комплекс NPR-технік. Застосовано модифікований рушій, який поєднував cel-shading з унікальними постобробними ефектами (додавання коміксних «крапок», штрихів, намальованих ліній) прямо на 3D-зображення (див. рис 2.16).

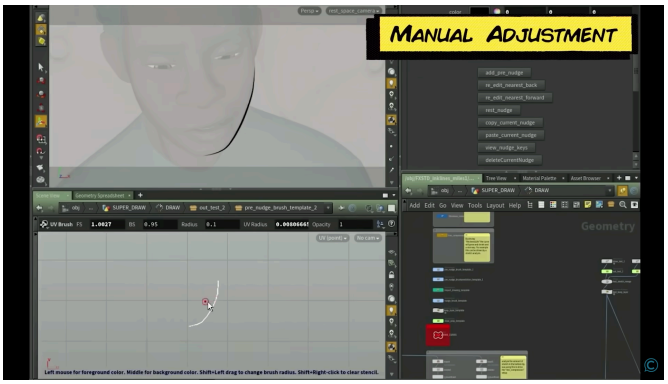


Рисунок 2.16 – NPR техніка. Cell-shading + Grayce pencil. Ресурс: reddit.com

Також анімацію персонажів здійснювали «по двоє» (12 fps замість стандартних 24) [65]. Текстури пофарбовані в стилі коміксу: графічні ефекти (хетчинг, тіні-графіка) додаються безпосередньо на поверхню моделей. Завдяки поєднанню коміксної естетики з 3D-анімацією мультфільм створює враження

«живого коміксу». Стиль відрізняється плавною зміною настроїв від яскравих екшн-сцен до інтимних моментів, підкреслених кольором і тінями.

Гра Genshin Impact компанії miHoYo створена на Unity (URP) із кастомним шейдером персонажів [51]. Розробники фактично імітують вигляд cel-shading у реальному часі. Суттєвим елементом графіки є ручні тіні та підсвітки в текстурах (див. рис. 2.17).



Рисунок 2.17 –Персонажі Genshin Impact. Ресурс: gematsu.com

Крім того, використовують спеціальні «ефекти розсіяного підсвічування»: край тіні може підсвічуватися кольоровим градієнтом (імітується SSS) для посилення пластичності. Ефективність шейдеру досягається компромісним поєднанням простих шейдерів (запікання основних ефектів у текстури) та оптимізації під мобільні пристрої.

Розробники ретельно підбирали кольорові палітри і форми героїв, щоб досягти характерного аніме-стилю. Відсутність самозатінення (модель персонажа не кидає тіні на себе) забезпечує однотонність і чистоту зображення. Графічний стиль «уніфікований» з художнім світом гри, що разом із сюжетними оновленнями утримує увагу мільйонів гравців.

Моделі персонажів гри Guilty Gear Xrd/Strive (Arc System Works) мають відносно мало полігонів (~40 тис.) та, найцікавіше, не використовують нормальні мапи [65]. Замість того художники вручну налаштовували вершинові нормалі на моделях, щоб забезпечити «правильне» світлотіньове відображення з

будь-якого ракурсу. Стиль гри практично ідентичний традиційній 2D-анімації, кожен кадр виглядає так, ніби намальований (див. рис. 2.18).



Рисунок 2.18 – Guilty Gear Xrd/Strive. Графіка. Ресурс: gamesoftrobo.ghost.io

Такий підхід дозволив не мати несподіваних артефактів затінення і зберегти читабельність форм. Текстури здебільшого прості: однотонні основні кольори та графічні обводки. Немає реалістичних деталей, затінення зводиться до мінімуму, натомість кожен блік чи лінія ретельно промальовуються («анімешний» вигляд). Завдяки простому шейдеру підтримувалася стабільна частота 60 fps на консолях. Технічні вимоги були низькими: відсутність нормальних мап і просте освітлення забезпечували високу продуктивність.

Наступним для огляду варто відзначити сучасного цифрового художника Alberto Mielgo [49]. Обидва короткометражні фільми The Witness та Jibaro «Кохання. Смерть. Роботи» Мільго створював як незалежні проєкти, тож вони базуються на покадровій 3D-анімації без захоплення руху. Використовувалися стандартні пакети 3D-анімації, доповнені програмами для тканини (Marvelous Designer) та ручного малюнка 2D-ефектів. Автор описує свій стиль наступним чином: «Такий мій стиль; він є результатом років живопису та роботи в анімації... Я б не сказав, що підхід є реалізмом; я б сказав, що він радше нагадує імпресіонізм. У персонажів немає пор чи глибоких деталей шкіри. Я позбавляюся всього, що мені не потрібно, що майже те саме, що й робиться з імпресіоністськими картинами».

Проєкти за авторством іспанського аніматора Альберта Мільго не є високобюджетними блокбастерами, скоріше творчими експериментами. У вкладену працю варто врахувати ручне анімаційне накладення кожної деталі, що цілком відповідає арт-напрямку. Завдяки авторському підходу вигляд «Jibaro» (див. рис. 2.19) цілісний і миттєво пізнаваний.

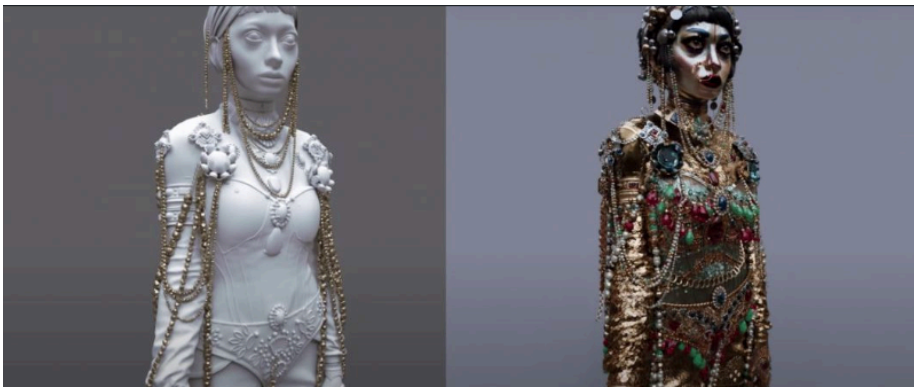


Рисунок 2.21 – Персонаж Jibaro. Ресурс: magmovies.net

Головна особливість підходу – відмова від гіперреалізму заради художньої виразності. Золото сирени у «Jibaro» не копіює реальність, а передає ідею спокуси через насичені кольори та яскравий блиск. Текстури розповідають історію, де бруд на обладунках конкістадорів показує довгу подорож, а надприродне сяйво фантастичних елементів підкреслює їхню незвичайність.

РОЗДІЛ 3
ПРОЄКТУВАННЯ 3D ПЕРСОНАЖА В СТИЛІ СТІМПАНК З ВИКОРИСТАННЯМ 2D ТЕКСТУРУВАННЯ

3.1 Аналіз особливостей стилю стімпанк

Стімпанк – це ретро-футуристичний напрямок, який поєднує естетику вікторіанської епохи з технологіями парових машин, шестерень, металу і механіки [34]. У контексті проєктування 3D персонажа це означає, що дизайн має відображати як історичні мотиви XIX століття, так і фантастичні, альтернативно-історичні технології. На рисунку можемо побачити приклад чоловічого жіночого образів в стилі стімпанк з характерними механічними елементами (див. рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Жіночий та чоловічий образ у стилі стімпанк. Ресурс: pinterest.com

Одна з ключових особливостей стимпанку – увага до деталей механізмів: шестерні, гайки, болти, вентилі та важелі – типові елементи, які можуть бути вбудовані в одяг або як аксесуари. В одязі, який втілює стимпанк, домінують матеріали, що несуть характер міцності й механіки – шкіра, мідь, латунь і текстиль, зім’яті або штучно зістарені. Часто використовуються корсети, жилети, кринолiни, брюки в дусі джентльменів-мандрівників або інженерів.

Типові силуети натхненні вікторіанською модою – довгі спідниці, жакети, пальта, часто доповнені ременями, пряжками, шестернями (див. рис. 3.2).



Рисунок 3.2 – Жіночий стимпанк-корсет зі шкіри та металевих деталей. Ресурс: pinterest.com

Стімпанк-одяг вирізняється своєю унікальною комбінацією ретро-вікторіанських силуетів та механічних елементів. Добірка одягу у стилі стімпанк включає жилети з шкіри та бархату, брюки або спідниці з металевими пряжками і ременями, довгі жакети та пальта, корсети з декоративними шестернями і пружинами, а також аксесуари на кшталт окулярів-ґогглів, годинників на ланцюжку та декоративних ременів [33].

Усі елементи поєднуються так, щоб створити образ мандрівника, інженера або винахідника альтернативної історії, де технології XIX століття поєднуються з фантастичною естетикою. Такий підхід дозволяє не лише підкреслити стиль, але й створити цілісну візуальну історію, в якій кожна деталь одягу має значення. Добірка одягу на рисунку 3.3 наочно демонструє, як різні елементи стимпанку поєднуються між собою для створення завершеного образу.

Аксесуари в стімпанку – це ще одна важлива складова. Типові предмети: гоггли, тростини, кишенькові годинники, механічні респіратори або маски,

капелюхи (циліндри, котелки), ланцюги, ремені з шестернями, браслети, кулони, гірлянди трубок та клапанів. Маска, яка нагадує протигаз або респіратор, цілком вписується в стимпанк-стиль і підкреслює індустріальну тематику персонажа (див. рис. 3.3).

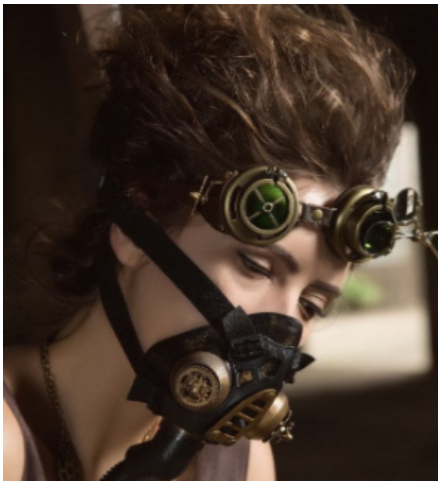


Рисунок 3.3 – Маска-респіратор у стилі стимпанк. Ресурс: pinterest.com

Щодо кольорової гами – переважають нейтральні, приглушені тони: коричневий, сірий, чорний, а також металічні – латунь, бронза, мідь. Також можуть бути вставки з червоної цегли, темно-зелені або бордові елементи – усе залежить від того, наскільки «механічний» образ персонажа [42].

Ще один важливий момент – пропорції механіки та тканини. У дизайні персонажа повинна бути гармонія: надлишок металу зробить образ перевантаженим, а занадто багато тканини – втратить стімпанковий характер.

Стімпанк також поділяється на декілька різновидів: класичний, дизель та атом або солар. Класичний стімпанк (Victorian Steampunk) – базується на естетиці вікторіанської епохи, парових машин та механіки XIX століття. Характерні ознаками стиля виступають шестерні, парові двигуни, латунь, дерев’яні та шкіряні деталі. Дизельпанк (Dieselpunk) – варіація стімпанку, що переносить естетику в період між Першою і Другою світовими війнами, присутні елементи електроніки, військової тематики та промислові мотиви. Атомпанк / Солярпанк (Atompunk / Solarpunk) – менш поширений підстиль,

поєднує ретро-технології з футуристичними енергетичними або екологічними концепціями.

Рівень деталізації стилю стімпанк: високий – багато дрібних механічних елементів: шестерні, труби, клапани, парові двигуни, декоративні гайки, манометри. В текстурах використовується комбінування металевих, шкіряних, дерев'яних і скляних поверхонь. Здійснюється акцент на зношеність, потертості, корозію. Залучаються наступні технологічні прийоми: карти нормалей і спекулярні карти для відтворення дрібних деталей без збільшення полігонів; використання texture atlases для оптимізації; деталізація костюмів і аксесуарів через 2D-текстури і високу ретельність UV-розгортки. Підстилі дизельпанк і атомпанк часто мають трохи меншу деталізацію у дрібних декоративних елементах, натомість роблять акцент на масивних об'ємах і промислових конструкціях.

Окрім стімпаку існують і інші стилі та жанри, наприклад біопанк та кіберпанк. Біопанк є одним із суміжних напрямів, що розвивався пізніше і зосереджується на біотехнологіях, генної інженерії та взаємодії людини з біологічними системами. У біопанку часто присутні органічні модифікації живих істот, клонування, гібридні істоти та експериментальні біологічні пристрої. Стиль підкреслює органічні форми та етичні проблеми, пов'язані з втручанням у природу, і створює більш «живу» і водночас футуристичну атмосферу. Біопанк, вбирає такі напрями як класичний біопанк стиль, нанобіопанк та медичний біопанк.

У свою чергу, класичний біопанк фокусується на біотехнологіях, генетиці та модифікації організмів, елементами якого є клони, кібербіологічні органи, генетично модифіковані істоти. Рівень деталізації стилю біопанк є високим, з акцентом на органічні форми та біотехнологічні модифікації (кібернетичні органи, мутації, гібридні організми). Його текстури передають поєднання шкіри, тканин, слизових покриттів, металу й прозорих матеріалів для внутрішніх органів або біотехнологічних елементів.

Нанобіопанк (Nanobiopunk) – акцентован на нанотехнологіях у біології, наномодифікації тканин, організмів та створення «живих машин». А медичний біопанк (Medical Biopunk) на експериментах у медицині та етичних проблем модифікації людського тіла.

Кіберпанк же виник як урбаністично-технологічний стиль і підкреслює вплив комп'ютерних технологій, кібернетики та штучного інтелекту на суспільство. Для кіберпанку характерні неонові вогні мегаполісів, високотехнологічні пристрої, цифрові інтерфейси та постіндустріальні міські ландшафти. Головний контраст із стімпанком полягає в стилістичному фокусі що відсилає до минулого з альтернативними технологіями. Кіберпанк показує майбутнє, де людина й технології перебувають у напруженій взаємодії.

Кіберпанк поділяють на класичний, соціальний, кібербіо стилі. Класичний кіберпанк формується через образи футуристичного мегаполісу, неону, високих технологій, образу хакера, штучного інтелекту і цифрового підпілля. Рівень деталізації стилю від середнього до високого, з фокусом на електронні та урбаністичні елементи: імпланти, неонові вставки, кабелі, цифрові інтерфейси. Застосовуються текстури неону, глянецю, блиску металу, підсвічування, скляні і пластикових поверхонь.

Соціальний кіберпанк (Social Cyberpunk) - це стиль соціальних і політичних проблем корупції, корпоративному контролі, нерівності у технологічному світі. Соціальний кіберпанк потребує великої деталізації середовища та костюмів. А стиль кібербіопанк (Cyberbio Punk) – це змішання впливу стилей кіберпанку та біопанку, кібернетичні імпланти та біотехнології, взаємодія людини й машини на рівні організму. Додає дрібні імпланти, органічні інтеграції у костюми

Порівняльний аналіз цих стилів допомагає зрозуміти унікальні особливості стімпанку: поєднання ретро-естетики та механічних елементів, увага до деталей і фактур, а також художнє відтворення технологій минулого в умовах фантастичного світу. Знання про біопанк і кіберпанк дозволяє гейм-дизайнерам і художникам чіткіше визначати межі стилю та обирати

характерні елементи для 3D-персонажів, уникаючи змішування з іншими жанрами без відповідного задуму.

Отже, стімпанк – це стиль, який виник на межі фантастики та історії, поєднуючи в собі вікторіанську естетику з уявною технологією парових машин і механічних гаджетів. Він створює відчуття світу, де наука і техніка розвивалися за альтернативними законами, а механізми стали невід'ємною частиною повсякденного життя. У ньому ретро-елегантність зустрічається з індустріальною грубістю, що надає всьому образу особливої чарівної неповторності. Суть стилю полягає в поєднанні старовинної елегантності та технічної вигадки. Стімпанк створює світ, де кожна деталь має значення і може розповісти історію про альтернативне минуле або майбутнє. Тут важливо не просто наслідувати минуле, а втілити його через фантастичні технології – це робить стиль живим, експресивним і надзвичайно атмосферним.

3.2 Технологічні особливості персонажів створених в стилі стімпанк

Стімпанк як стиль історично пов'язаний з другою половиною XIX століття, з епохою промислової революції у Великій Британії та вікторіанською Англією. Сам термін «стімпанк» буквально поєднує слова «steam» (пара) та «punk» (бунтівний), з одного боку це ностальгія за механічною естетикою минулого, з іншого протест проти сучасного технологічного прогресу. Стімпанк не обмежився літературою, його ідеї проникли в кіно, музику, ігри, комікси, серіали. естетика стімпанку поєднує в собі парові машин, механізми які створені з шестерень, протезів [90]. Стімпанк як стиль характеризується особою кольорово гаммою, основні кольори що асоціюється зі стімпанком: темно-коричневий, чорний, мідний, бронзовий, червоний. Атмосфера ретро інтер'єру створює відчуття старовинного світу, наповненого механізмами із шестерень (див. рис 3.4).



Рисунок 3.4 – Інтер'єр у стилі стімпанку. Ресурс: fr.dreamstime.com

Одним з прикладів використання стиля стімпанк представлено в коміксі «Воля» (див. рис. 3.5), українському фантастичному романі, дія якого відбувається в альтернативному всесвіті Української революції 1917–1921 років, де Україна не зникла у 1918, і стала потужною державою та розвивається завдяки технологічному прогресу [36] .



Рисунок 3.5 – Воля. Комікс. Обкладинка. Ресурс: geekach.com.ua

У коміксі можна побачити як використовують дирижаблі, екзоскелети, механічні протези що підкреслює технічний прогрес та естетику стімпанку. Архітектура нагадує індустріальні пейзажі Донеччини або Львова з димовими

трубами, а елементи костюмів персонажів, такі як вишиті сорочки з ременями, окулярами-гоглями, циліндри, корсети, жилети тощо, відображають моду початку XX століття та вікторіанську епоху.

Український Роман Ігоря Сіліври «Цепелін до Києва» також є прикладом стімпанку, що поєднує в собі альтернативну історію з паровими технологіями та ретро футуризмом. Дія відбувається в Києві, де два київські поліцейських розслідують загадкові події, що змінюють уявлення про реальність. Сюжет поєднує детектив, наукові дослідження та елементи містики. В книзі присутні парові машини, гігантські дирижаблі, ретро футуристичні транспортні засоби, що показує естетику стімпанку (див. рис 3.6).



Рисунок 3.6 – Цепелін до Києва. Обкладинки книги . Ресурс: goodreads.com

Обкладинка роману Ігоря Сіліври «Цепелін до Києва» візуально відображає ключові риси жанру стімпанк та задає атмосферу альтернативної історії ще до знайомства з текстом. Через те, що книга присвячена дослідженню парових механізмів, то центральним образом композиції виступає дирижабль, який асоціюється з паровими технологіями та індустріальною епохою, характерною для стімпанкової естетики. Його поява в небі над Києвом символізує поєднання реального міського простору з вигаданим ретрофутуристичним світом, де науковий прогрес розвивається за іншими законами.

Колористичне рішення обкладинки витримане у приглушених теплих тонах: відтінках сепії, коричневого та бронзового, що відсилає до металу, механізмів і парових машин. Таке кольорове оформлення підсилює відчуття старовинності та водночас технологічності, що є характерним для стімпанку. Архітектурні мотиви Києва, вписані в композицію, створюють впізнаваний локальний контекст і наголошують на альтернативному переосмисленні історичного міста.

Обкладинка до аудіокниги «Цепелін до Києва» зберігає основні візуальні елементи друкованого видання, однак адаптована до цифрового формату. Акцент робиться на чіткій, контрастній композиції, що добре зчитується в зменшеному масштабі. Дирижабль та індустріальні деталі виступають ключовими маркерами жанру, тоді як декоративні елементи зведені до мінімуму, щоб не перевантажувати зображення.

Використання стилю стімпанк також придставлено у серії ігор Bioshock 2007 року у жанрі шутера. Візуальна естетика стилю в грі Bioshok (див. рис. 3.7) базується на використанні металевих елементів, зокрема мідь, бронза, шестерні, труби та механізми, що створюють образ старовинних машин та стилю стімпанк. Однією із цікавих функцій, які доступні персонажу у даній грі, є те, що можна передавати і ловити речі один одному у повітрі, тобто персонажу кидають певну річ і він може її зловити.



Рисунок 3.7 – Bioshock. Гра. Графіка. Ресурс: youtube.com

В оформленні інтер'єрів використовують труби, шестерні, масивні двері, повітряні шлюзи, металеві конструкції. Хоча підводне місто іноді є не зовсім класичним стімпанком із паровими машинами, але тут багато рис жанру: складні механізми, інтерєри з дерева та металу, старовинні телефони, друкарські телефони, годинники, шестерні. Атмосфера в грі це контраст між занепадом та розкішшю, між науковим прогресом та катастрофою. Розкішний інтер'єр, яскраві кольори поєднанні з брудом, іржею та розрухою. Гра насичена технологіями та механізмами, які є прикладом стімпанку та формують унікальну атмосферу підводного міста. В грі присутні автоматизовані турелі, роботизовані охоронці.

Плазміди можна назвати симбіозом біотехнології та наукової фантастики, що додає до стімпанкового стилю біопанк. Арсенал зброї в грі містить звичайну вогнепальну зброю наших років: пістолет-кулемет, гранатомет, дробовик, які можна вдосконалювати в процесі проходження гри. Також в грі встановлені торгові автомати, медичні станції, автомати для вдосконалення зброї, всі ці пристрої мають ретро дизайн з механічними деталями. Одним з найтехнологічніших механізмів є костюм великих татусів, які є справжніми броньованими механічними монстрами з буром або гарпуном.

Перша частина серії Dishonored (2012) також є гарним прикладом використання стилю стімпанк (див. рис. 3.8) [61]. Дія гри відбувається у вигаданому місті Дануолл, що переживає епідемію чуми та занепад. Світ гри поєднує технології, вікторіанську естетику та магію, створюючи унікальну атмосферу.



Рисунок 3.8 – Dishonored. ГРа. Архітектура Дануолла. Графіка. Ресурс: youtube.com

Стиль демонструється через атмосферу бароко з елементами неоготики, кам'яними будівлями, вузькими вуличками, що оформленні трубами, залізними конструкціями, підкреслюючи атмосферу технологічного прогресу [76]. Важливим архітектурним об'єктом є вежа, резиденція правлячої династії, що виконана в готичному стилі з витягнутими шпилями та вітражними вікнами, вселяючи страхітливість і символізуючи владу та контроль. Технології Дануолла є поєднанням електрики та складної механіки: електричні вагонетки, механізовані великі охоронці (автоматони) якимиуправляє людина, механічні пастки, автоматизовані турелі. Головна технологія в грі це використання китового жиру як джерело енергії, його використовують для всього.

Kaiser Calls! – це унікальна комп'ютерна гра у жанрі стратегічної пригодницької RPG, виконана у стилі стимпанку, яка переносить гравця у паралельний всесвіт на межі промислової революції та магії (див. рис. 3.9). Є прикладом проекту, де дизайн персонажів, інтерактивність і стилістичне оформлення об'єднані у цілісний світ, який надихає на дослідження та творчість, а також дозволяє гравцеві відчути себе частиною механічної, проте живої всесвітньої системи, що розкриває багатство стимпанк-естетики та інноваційного геймплею.

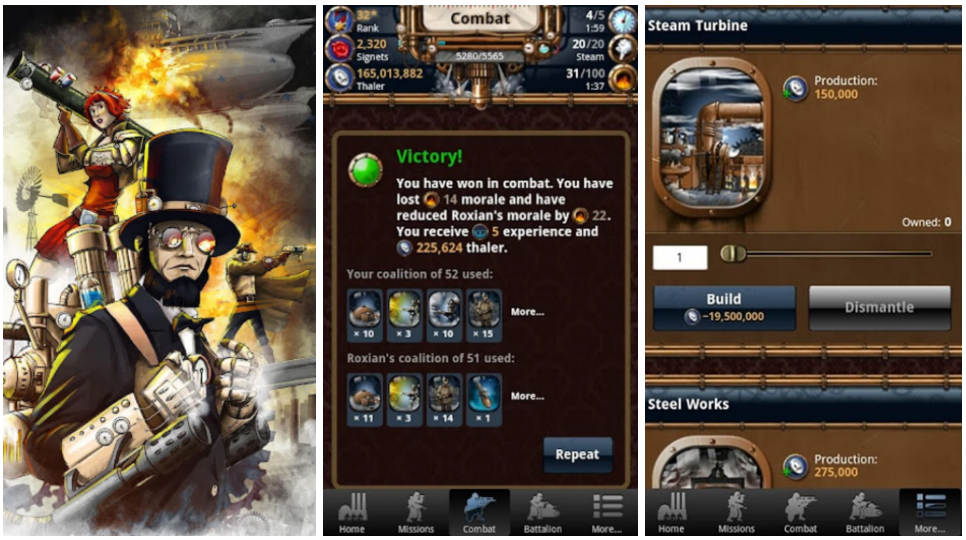


Рисунок 3.9 – Kaiser Calls!. Гра. Графіка. Ресурс: play.google.com

Світ гри наповнений механічними винаходами, повітряними кораблями, заводами та фабриками, де кожна деталь створює атмосферу ретро-футуристичного часу. Особливістю гри є інтерактивність персонажів, які представлені як складні модульні конструкції [84]. Кожен герой складається з окремих частин: будови тіла, одягу, аксесуарів, взуття та інших елементів, які формують його образ і впливають на ігровий процес. Гравець має можливість досліджувати персонажів у великій деталізації, розглядаючи їх зверху вниз, від капелюха до взуття, і навіть комбінувати елементи різних героїв, створюючи унікальні комбінації та нові образи, що мають певні функціональні властивості в грі. Інтерфейс гри виконаний у характерному для стимпанку стилі старовинних приладів, ілюмінаторів, манометрів та шестерень, що підкреслює атмосферу механічного світу. Меню та інформаційні панелі оформлені як бронзові металеві рамки з рухомими деталями, а навігація по світу здійснюється через круглі лінзи та прилади, що дозволяє гравцеві бачити навіть найдрібніші деталі ігрового середовища [84].

SteamWorld Dig — це пригодницька 2D-гра в жанрі «метроїдванія» з яскраво вираженим стимпанк-стилем, розроблена студією Image & Form. Гравець керує роботом на пару на ім'я Расті (Rusty), який успадковує шахту від свого дядька Джо і прибуває до занедбаної шахтарської містечка Тамблтон. У цьому світі поєднані естетика старого Заходу, механічні конструкції, шестерні, парові двигуни та бронзові елементи інтер'єру, що створює відчуття живого стимпанк-світу. Геймплей зосереджений на дослідженні підземних просторів. Расті риє землю, добуває руду, дорогоцінні камені та інші ресурси, використовуючи при цьому інструменти в стилі стимпанк: кирки з бронзовими шестернями, лампи з паровим приводом, динамітні заряди з механічними детонаторами [85]. Добуті ресурси піднімаються на поверхню для продажу в містечку, де гравець може купити апгрейди і поліпшення для свого обладнання. Підземні зони шахти оформлені у характерному стимпанк-дизайні: руїни старих механізованих шахт, металеві платформи, парові вентилятори, гідравлічні підйомники та механічні ворота (див. рис. 3.10).



Рисунок 3.10 – SteamWorld Dig. Гра. Графіка. Ресурс: youtube.com

На поверхні Тамблтона гравець взаємодіє з містечком, де будівлі та магазини оформлені як парові конструкції, з бронзовими трубами, вентилями та механічними вивісками. Інтерфейс гри підтримує стимпанк-тему: усі панелі, меню та інформаційні вікна стилізовані під металеві рамки з рухомими шестернями, а навігація по шахті відбувається через круглі лінзи та механічні прилади, що дозволяє гравцеві бачити навіть найдрібніші деталі (див. рис. 3.11).



Рисунок 3.11 – SteamWorld Dig. Портрет персонажа. Ресурс: nichegamer.com

У процесі спуску Расті зустрічає ворогів – підземні механічні істоти, пастки та інші загрози, дизайн яких виконаний у стилі стимпанк: механічні черви, роботи-охоронці з шестернями, вентилятори та гідравлічні пастки. Важливо стежити не лише за здоров'ям персонажа, а й за запасом світла та ресурсів для стимпанк-інструментів, без яких спуск стає неможливим [85].

Цикл «спуск – видобуток – підйом – апгрейд» підтримує стимпанк-тему: усі інструменти та обладнання гравця мають деталі з бронзи та сталі, шестерні обертаються, а парові механізми додають відчуття живого світу. Графіка гри виконана у ручному 2D-стилі з яскравими фонами та механічними конструкціями, а персонажі-роботи мають дружній, але водночас промисловий вигляд, підкреслюючи естетику стимпанку (див. рис. 3.12).

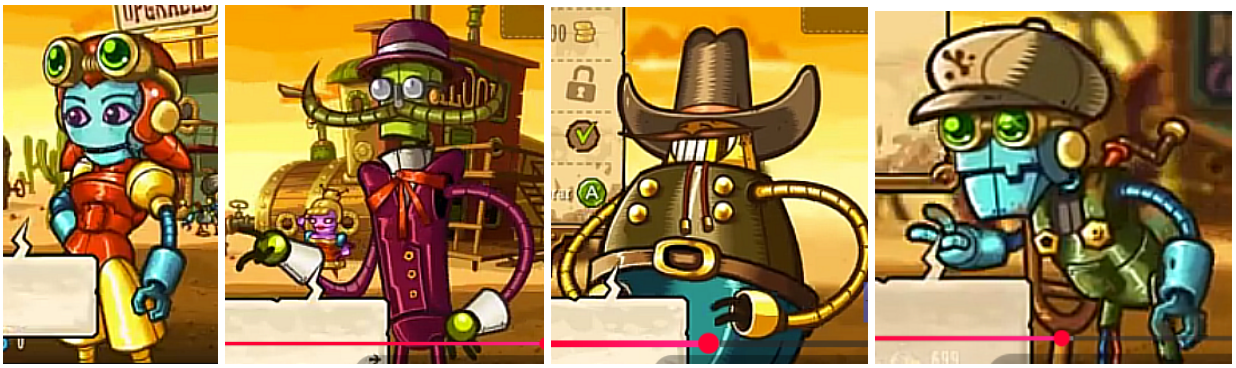


Рисунок 3.12 – SteamWorld Dig. Персонажі в стимпанк-стилі. Ресурс: youtube.com

Кейт Вокер у світі Syberia виглядає стримано, але її зовнішність добре відображає дух клокпанк / стимпанк-середовища, в якому вона діє. Вона –

молода юристка з Нью-Йорка, яка подорожує Європою та пізніше Сибірією серед механічних конструкцій, автоматонів та старовинних парових машин. Її обличчя спокійне, з чіткими рисами, а вираз – рішучий, водночас раціональний, що підкреслює її інтелектуальний характер, а не бойову натуру (див. рис. 3.13) [44].



Рисунок 3.13 – Syberia. Гра. Кейт Вокер. Ресурс: pinterest.com

Щодо одягу, Кейт носить практичний і водночас елегантний костюм, який прекрасно вписується в стимпанк-естетику. Зазвичай це світло-бежевий жакет зі шкіри або тканини, з поясом на талії, темно-коричневі брюки або легінси і високі черевики. Вона також має шарф червоного кольору, який додає кольоровий акцент, і рукавички, що підкреслюють готовність до практичної роботи — все це створює вигляд «інженерки-мандрівниці», яка легко комбінує діловий стиль із пригодницьким.

Букер ДеВітт — це суворий, замислений чоловік із досвідом солдата та приватного детектива. Його зовнішність відображає змішання практичності та старовинної естетики початку XX століття: він має міцну статуру, вираз обличчя з натяком на втому та гіркоту, що підкреслює його непросте минуле. За даними *BioShock Wiki*, він має частково коріння серед сіу — це додає глибину його образу, адже він носить тягар провини та внутрішню боротьбу (див. рис. 3.14) [12].



Рисунок 3.14 – Syberia. Гра. Букер ДеВітт. Ресурс: pinterest.com

Щодо його одягу: типово він одягнений у чорну сорочку з білими манжетами, темний жилет (часто синювато-темного кольору), вузькі (pin-stripe) штани, і червоний шарф або шийна хустина, що надає кольоровий акцент. Додатково, він носить шкіряний наплічний холстер, через який кріпить зброю, а також часто має забинтовану руку або пальці – це натяк на його фізичні конфлікти та травми. Його зовнішній вигляд поєднує в собі стриманість та брутальну функціональність – саме те, що відповідає його ролі колишнього солдата, репортера й детектива.

Що стосується створення персонажа: за даними з обговорень на Reddit, дизайн Букера був продуманий досить рано у розробці гри. Один користувач пише, що «хоча деталі, як його одяг, змінювались, він завжди мав залишатися грубим брутальним чоловіком», але пізні версії концепт-артів показують більш світгливаного, «втомленого життям» чоловіка, а не холоднокровного вбивцю. Згідно з цими розробками, художник Родд Уотерс (Rodd Waters) створив ескізи Букера, які підкреслювали суміш жорстокого минулого й глибоких емоцій – саме це й показано в остаточному дизайні персонажа [12].

Йозеф – головний герой гри Machinarium (див. рис. 3.15), маленький дружній робот із металевого, світло-сірого корпусу. Його голова має великі циліндричні очі, які можуть рухатися незалежно одне від одного, а на верхівці розташований розеткоподібний елемент, який нагадує гніздо для штекера. Тіло

Йозефа сегментоване: він може подовжуватися або скорочуватися, пристосовуючи свою висоту, а його кінцівки – руки й ноги – досить гнучкі й мають циліндричну форму з «лапками», які нагадують клешні. Його щелепа іноді опадає, і він сам засовує її руками назад, а голова може повертатися на 360°, що підкреслює його механічну конструкцію [72].

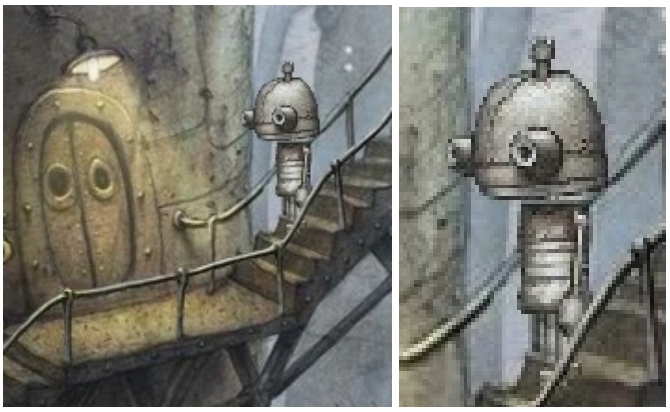


Рисунок 3.15 – Machinarium. Гра. Головний персонаж. Ресурс: youtube.com

У плані «одягу» Йозеф не носить традиційного вбрання – він сам є механічною машиною. Його корпус і кінцівки не прикрашені, виключно металічні, без яскравих кольорів чи зайвих декоративних елементів – все має функціональний та лаконічний дизайн. Його металевий вигляд, з елементами, скріпленими заклепками, викликає відчуття старого, трохи зношеного робота, що живе у занедбаному індустріальному місті.

3D персонажі у стилі стимпак поєднують механіку, індустріальну естетику та візуальні елементи, натхненні XIX століттям (див. рис. 3.16). Вони зазвичай мають металеві або бронзові елементи, шестерні, пружини, трубки та парові механізми, що додають відчуття «живого механізму». Такий дизайн створює враження, що персонаж одночасно механічний та живий [11].



Рисунок 3.16 – Розробка 3D персонажа у стилі стимпанк. Ресурс: turbosquid.com

Їхнє тіло часто сегментоване: кінцівки можуть складатися з металевих панелей або циліндричних частин, тулуб прикрашено шестернями, важільними або гідравлічними конструкціями. Очі можуть бути лінзами, ілюмінаторами або світловими індикаторами, а на голові або плечах часто розміщують додаткові прилади: антенки, вентилятори, клапани для пари. Одяг або броня персонажів виконана у стилі індустріальної мілітарії XIX століття: жилети, пояси з інструментами, рукавички з шестернями, високі чоботи з металевими вставками [26].

Колірна палітра зазвичай стримана – бронза, мідь, чорний, сірий, з акцентами червоного, синього або зеленого для світлових ефектів. Рухи персонажа в 3D можуть бути стилізовані під «кроки механізму», тобто плавні, але з невеликими ривками, щоб підкреслити відчуття роботи пружин і шестерень (див. рис. 3.17).



Рисунок 3.17 – 3D персонажі у стилі стимпанк . Ресурс: artstation.com

Такі персонажі широко використовуються у відеоіграх, анімаціях та 3D-концептах: наприклад, роботи-годинникарі, механічні солдати, парові екзоскелети, або ж дружні автономні механізми у світах на кшталт SteamWorld Dig, Machinarium або Clockwork Pilot. Вони дають величезний простір для творчості: можна комбінувати людські риси з механічними деталями, роблячи персонажа одночасно «живим» і «механічним».

Тож, можна узагальнити, що стімпанк-персонажі вирізняються унікальною комбінацією художніх елементів та технологічних рішень, що визначають як їхній візуальний образ, так і процес реалізації у 3D. Основними технологічними особливостями таких персонажів є: механічні деталі та конструкції, матеріали і фактури, декоративні і функціональні елементи, стилізація образу, його рух і анімація.

Стімпанк-персонажі містять численні механічні елементи: шестерні, пружини, клапани, труби, парові двигуни та інші складні конструкції. При моделюванні важливо точно передавати їх форму, розташування та взаємодію, щоб підкреслити реалістичність рухомих частин. У текстуруванні ці елементи виділяються металевими фактурами, потертостями та слідами зношення.

Для створення стилю характерне поєднання металу (латунь, бронза, залізо), шкіри, дерева та скла. Важливо враховувати не лише колір, а й

властивості поверхні: блиск, шорсткість, рефлективність. Технологічно це реалізується через різні карти текстур (diffuse, specular, roughness, normal), що дозволяють створити ефект глибини та реалістичності.

Стімпанк-персонажі часто мають декоративні елементи, що одночасно несуть функціональне навантаження: годинникові механізми, манометри, трубопроводи, шестерні на одязі та аксесуарах. При роботі з 3D-моделлю важливо правильно розташувати такі деталі, щоб вони не порушували пропорції та не перевантажували композицію.

У стімпанку важлива цілісність стилю: персонаж має виглядати частиною «альтернативного світу» з елементами ретро-футуризму. Технологічні особливості, такі як симетрія деталей, погодженість колірної палітри та інтеграція механічних частин у костюм, визначають художню завершеність моделі.

Технічно персонажі повинні бути адаптовані до продуктивності гри: моделі повинні мати оптимальну кількість полігонів, текстури – збалансовану роздільну здатність. Для збереження візуальної деталізації при обмежених ресурсах використовуються карти нормалей, спекулярні карти та комбіновані текстури (Atlases), що дозволяють передати складні поверхні без надмірного навантаження на рушій.

Механічні елементи стімпанк-персонажів часто передбачають рух або інтерактивні частини. Технологічно це вимагає правильного розгортання UV-карт, розділення моделі на окремі елементи та підготовки її для рігід- та скелетної анімації.

Таким чином, технологічні особливості стімпанк-персонажів поєднують ретельну художню стилізацію з продуманими технічними рішеннями: вибором матеріалів, фактур, типів текстур та структурою моделі для оптимальної роботи в 3D-середовищі. Знання цих особливостей є критично важливим для створення реалістичних та ефектних персонажів, що органічно вписуються в ігровий світ.

3.3 Створення та текстурування 3D персонажа

Текстурування 3D-персонажа є ключовим етапом у створенні візуально привабливої моделі, який безпосередньо впливає на сприйняття персонажа користувачем та на загальну естетичну цілісність гри. Хоча моделювання і текстурування тісно пов’язані, вони мають свої особливості: перше визначає форму та обсяг, а друге – поверхню, матеріали та візуальні властивості об’єкта.

Під час роботи з базовою формою та подальшим скульптингом у ZBrush видно, що деякі ділянки моделі легко піддаються накладанню текстур, а інші викликають труднощі.

Першим етапом моделювання була робота з базовою формою. Я почала з простих геометричних форм, (сфери, куби, циліндри), які виступають як основні блоки конструкції. (див. рис 3.18). У ZBrush це можна реалізувати через інструменти «Initialize» для встановлення початкової форми примітиву. Для прискорення роботи використовувався модифікатор «Mirror». Модифікатор «Mirror» застосовувався для оптимізації процесу моделювання. Його функція полягає у відтворенні дзеркальної копії об’єкта відносно вибраної осі. Завдяки цьому можна редагувати лише одну частину моделі, а друга автоматично формується як симетричне відображення першої.

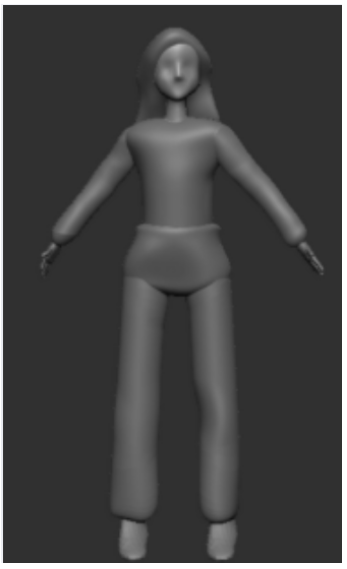


Рисунок 3.18 – Етап створення базової форми

Після того як була зроблена базова форма моделі, далі потрібно зробити скульптинг для більшої деталізації, в результаті якого модель з базової форми, стане повноцінним на вигляд тілом. Загалом даний процес дуже нагадує ліпку с глини чи пластиліну, що дозволяє моделювати з максимальною свободою. Важливо використовувати симетрію для однакової корекції обох сторін моделі та функцію згладжування (Smooth), щоб уникнути зайвих нерівностей. На цьому етапі варто підкреслити форми об’єкта, збільшуючи кількість полігонів у важливих місцях таких як обличчя та пальці. Це дозволяє точно передати анатомічні особливості, уникаючи втрати об’єму чи порушення пропорцій. Достатньо буде заокруглити форми в режимі скульптування за допомогою таких інструментів: Move (застосовувався для грубого коригування пропорцій та розміщення основних форм, дозволяючи швидко змінювати контури моделі); ClayBuildup (використовувався для нарощування об’єму та створення базової м’язової маси або складок); Clay (слугував для більш м’якого нанесення матеріалу, що дозволяло плавно моделювати перехідні форми та згладжувати об’єкти); Standard (такий же самий, як попередній, просто більш гострий, для детальнішої роботи).

Поступово уточнюючи форми, додавалися об’єми та текстурні елементи, що заклало основу для подальшої деталізації моделі (див. рис 3.19).

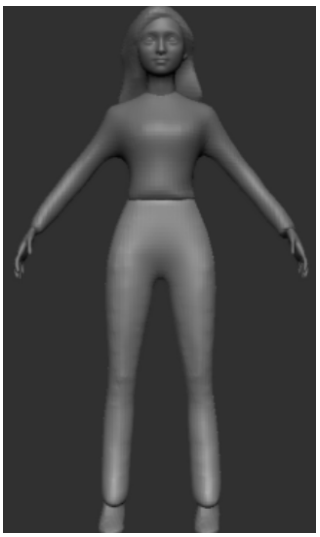


Рисунок 3.19 – Подальша деталізація моделі

До етапу фінальної деталізації був застосований Dynamesh, призначений для автоматичного ремешингу. Його активація дозволяє підтримувати рівномірну полігональну сітку незалежно від того, як сильно змінюється форма чи додаються нові елементи у процесі скульптингу. Можна витягувати чи з'єднувати частини моделі, і програма автоматично зробить поверхню однорідною, оптимальною для подальшого моделювання.

Після застосування Dynamesh, я перейшла до деталізації, проробивши складки на одязі, додавши дрібні нерівності, шви на сорочці та ремінь на штани. (див. рис 3.20).

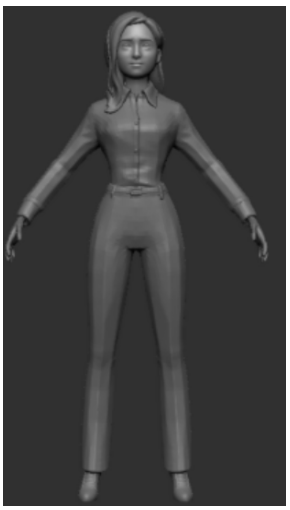


Рисунок 3.20 – Фінальна деталізація

Після завершення процесу деталізації 3D-моделі в програмі ZBrush було виконано експорт готової моделі у форматі FBX. Експортована модель була імпортована до програмного забезпечення Blender для подальшої обробки та налаштування. Після імпорту моделі у Blender було здійснено оптимізацію сітки (топології) для подальшої роботи (див. рис. 3.21).

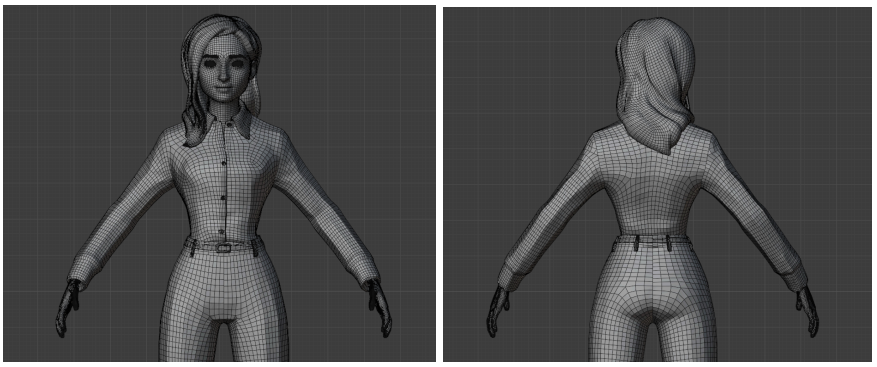


Рисунок 3.21 – Топологія моделі в Blender

Після оптимізації сітки я перейшла до створення UV-розгортки моделі для подальшого накладення текстур на модель, для фіналізації та рендерингу (див. рис. 3.22).

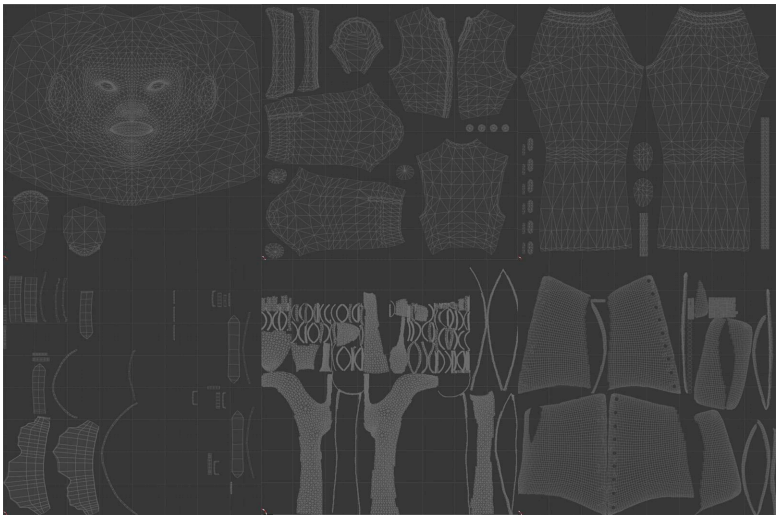


Рисунок 3.22 – Розгортка моделі

Далі, після створення UV-розгортки, для текстурування обличчя та очей, було використано малювання двомірних текстур у програмному забезпеченні Adobe Photoshop, у якому використовувалося ручне малювання поверх UV-розгортки (див. рис 3.23).

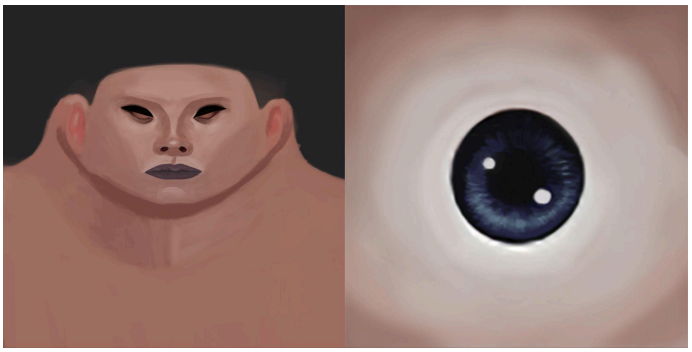


Рисунок 3.23 – Текстурування обличчя та очей

Після створення текстур лиця та очей за допомогою редактора відтінювачів в Blender, були створенні текстури, у 2D стилі для одягу та інших аксесуарів. Використання нодової системи Blender дало змогу реалізувати текстури у двовимірному стилі. Процедурний підхід дозволив експериментувати з кольорами та змішувати їх, роблячи 2D стиль (див. рис. 3.24).

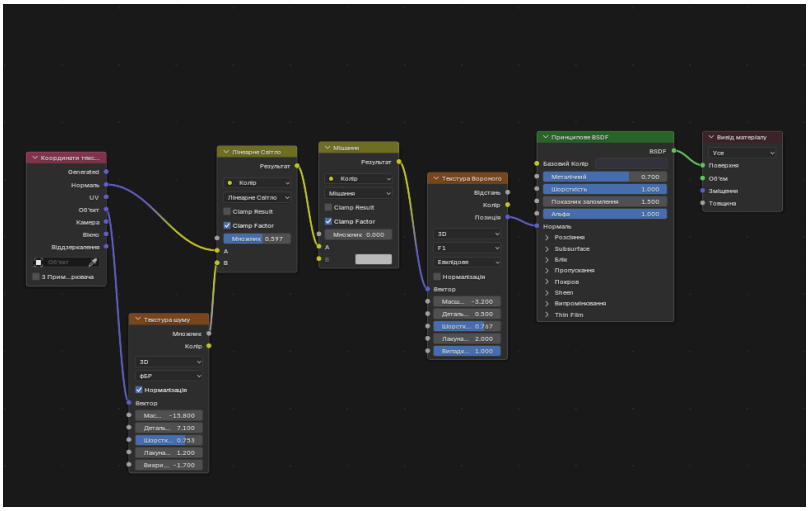


Рисунок 3.24 – Процедурне текстурування

Після цього 3D модель була поставлена в позу та зроблено рендер моделі (див. рис. 3.25).



Рисунок 3.25 – Фінальний результат.

Говорячи про деталі, які було текстуровані можна констатувати, що відносно прості геометричні поверхні, такі як руки, ноги або великі площини одягу, дозволяють точно накласти текстури без спотворень. Симетричні частини, створені за допомогою модифікатора «Mirror», також спрощують роботу, адже текстура, правильно налаштована на одній стороні, автоматично відображається на другій. Площини, які не містять складних вигинів або перетинів (наприклад, спина персонажа або грудна частина одягу), легко піддаються процедурному накладанню 2D-текстур і змішуванню кольорів.

Під час створення текстурування персонажу, дрібні деталі, такі як: пальці, обличчя, шви, ремені або дрібні аксесуари, потребують високої уваги при UV-розгортці та ручному малюванні текстур. Області зі складною геометрією (складки одягу, механічні елементи стімпанку) вимагають комбінованого підходу: ручне малювання + процедурні карти + використання нормалей та спекулярних карт. Ділянки, де поверхні перетинаються або мають нестандартну топологію (наприклад, стики між руками і рукавами), часто призводять до деформацій текстур, тому тут необхідно додатково коригувати UV-розгортку.

Пропоновані раціональні рішення, які допоможуть подолати труднощі під час процесу текстурування. Для складних елементів доцільно застосовувати процедурне текстурування та карти нормалей, що дозволяє зберегти

деталізацію, не перевантажуючи полігони. Використання 2D текстур для одягу та аксесуарів спрощує налаштування кольору та стилю, дозволяє швидко змінювати варіанти дизайну без повторного скульптингу. При поданні персонажа у ростовому форматі доцільно використовувати базові 2D текстури для великих площин та комбінувати з процедурними картами для деталізації ключових ділянок. При поданні у статичному режимі можна максимально деталізувати текстури обличчя, очей та механічних елементів, тоді як у динамічному (анімаційному) режимі краще оптимізувати текстури та використовувати нормальні карти, щоб зменшити навантаження на рушій.

Таким чином, під час роботи над персонажем у стилі стімпанк було виявлено, що різні частини моделі накладаються на текстури з різним ступенем складності. Так, великі площини, такі як спина персонажа або основні елементи одягу, накладаються відносно легко, оскільки вони мають просту геометрію і не містять різких вигинів. У таких випадках доцільним є використання двомірних текстур або процедурних карт, які дозволяють швидко експериментувати з кольоровою гамою, ефектами потертостей або змішуванням відтінків. Симетричні елементи, наприклад руки, ноги або декоративні деталі костюму, що дублюються за допомогою функції дзеркального відображення, також значно спрощують процес текстурування. Накладаючи текстуру на одну сторону моделі, можна автоматично відобразити її на протилежній, що економить час і дозволяє досягти високої точності.

Разом із тим, існують ділянки, накладання текстур на які є значно складнішим. Це, передусім, обличчя та руки персонажа, де необхідно точно передати дрібні деталі: риси обличчя, очі, нігті, складки шкіри та анатомічні особливості. Тут без ретельного ручного малювання текстур на UV-розгортці неможливо досягти бажаного рівня реалістичності. Аналогічно складними є місця зі складною геометрією, такі як складки одягу, дрібні ремені, шестерні та механічні елементи в стилі стімпанк. У цих зонах просте накладання 2D текстур призводить до спотворень або втрати деталізації, тому необхідне комбінування різних підходів: застосування нормалей, спекулярних карт, процедурних текстур

і ручного малювання. Особливу увагу слід приділяти стикам між частинами моделі, наприклад між рукою та рукавом, шиєю та коміром, оскільки тут часто виникають проблеми з UV-розгорткою, через що текстури можуть розтягуватися або з’являються шви.

Важливим аспектом текстурування є баланс між художньою виразністю та технічною доцільністю. Для деталей, які легко піддаються процедурному текстуруванню, оптимально використовувати комбіновані 2D карти, що дозволяє швидко змінювати кольори, експериментувати з відтінками і створювати характерну стилізацію без додаткового навантаження на рушій. Для складних елементів, таких як механічні частини костюму чи обличчя персонажа, доцільно застосовувати карти нормалей та спекулярні карти, які забезпечують відтворення дрібних деталей без збільшення кількості полігонів. Це особливо важливо для ігрових проєктів, де продуктивність рушія та оптимізація полігональної сітки мають критичне значення.

Ще один цікавий аспект текстурування – залежність його технології від подання персонажа. У ростовому форматі, коли персонаж демонструється повністю, оптимальним є поєднання 2D текстур для великих площин і процедурних карт для дрібних деталей, що забезпечує швидкість роботи та візуальну цілісність. Для статичних зображень, наприклад для промо-картинок або рендерів, доцільно максимально деталізувати обличчя, очі, складки одягу, механічні елементи, а також додати декоративні потертості, подряпини та акценти, що підкреслюють стиль стімпанку. У динамічному поданні, як у грі з анімацією, пріоритетом стає оптимізація ресурсів: великі площини і одяг текстуруються через нормалі та спекулярні карти, дрібні елементи можна частково поєднувати в texture atlases, що дозволяє зберегти продуктивність рушія і уникнути сповільнення кадрів.

Під час роботи над текстурами персонажа виявилося, що накладання текстур тісно залежить від попередньо виконаного моделювання. Прості, чисті форми моделі спрощують текстурування, оскільки текстури не спотворюються, UV-розгортка легше коригується, а художні ефекти можна застосовувати більш

вільно. У той же час деталі, що містять багато перетинів, дрібні декоративні елементи або механічні конструкції, значно ускладнюють роботу, вимагаючи комбінації ручного малювання, процедурного текстурування та використання карт нормалей. Це створює своєрідну «стиковку» процесів моделювання та текстурування: чим більш деталізованою є геометрія моделі, тим більшу увагу слід приділяти правильному нанесенню текстур.

Отже, текстурування 3D-персонажа у стилі стімпанк – це процес, який поєднує художню роботу та технічну оптимізацію. Виявлені нюанси дозволяють формувати практичні рекомендації: прості ділянки накладати процедурними або 2D текстурами, складні – вручну та з використанням нормалей, а подання персонажа у різних форматах (ростовий, статичний, динамічний) визначає пріоритети щодо деталізації та оптимізації. Такий підхід забезпечує баланс між високою візуальною якістю, стилізацією та продуктивністю у грі, роблячи модель готовою для подальшого рендерингу та інтеграції в ігрове середовище.

ВИСНОВКИ

У рамках дослідження було здійснено комплексний аналіз технологічних особливостей текстурування 3D-персонажів у контексті створення гри «Мінне поле» у стилі стімпанк. У межах аналізу понятійного апарату, термінів і принципів текстурування було систематизовано ключові поняття та класифікації, що дозволило уточнити предмет дослідження, визначити основні технічні та художні параметри процесу і забезпечити основу для подальшої практичної роботи. Це дало змогу чіткіше окреслити роль текстурування у формуванні візуальної цілісності персонажа, а також у взаємодії з гравцем та ігровим середовищем.

У межах ретроспективного аналізу розвитку технологій текстурування було досліджено еволюцію методів від простих двомірних карт до сучасних комбінованих підходів із застосуванням процедурних карт, нормалей, спекулярних і roughness-карт. Це дозволило визначити, що сучасні методики забезпечують високу деталізацію при оптимізації ресурсів, що є особливо важливим для ігрових проєктів із обмеженою продуктивністю. Було виявлено, що інтеграція ручного малювання та процедурного текстурування на різних етапах створення моделі дозволяє досягти бажаного балансу між художньою виразністю та технічною доцільністю.

Розкриття сутності та основних етапів текстурування показало, що цей процес включає підготовку UV-розгортки, створення базових текстур, деталізацію через карти нормалей та спекулярні карти, інтеграцію процедурного текстурування та фінальну оптимізацію. Аналіз прикладів текстурованих 3D персонажів дав змогу виявити характерні художньо-технологічні прийоми, серед яких застосування процедурних текстур для великих площин та ручне малювання для дрібних деталей, а також комбіноване використання карт для передачі матеріальності поверхонь.

У межах дослідження методик і технологій текстурування в сучасних програмах було проаналізовано функціонал Blender, Substance Painter та Unreal

Engine, визначено оптимальні стратегії роботи з різними типами карт і можливості процедурного та ручного підходів. Встановлено, що ефективне використання цих інструментів дозволяє створювати деталізовані та стилізовані 3D моделі, адаптовані до різних сценаріїв використання: у ростовому форматі, статичних сценах або динамічних ігрових процесах.

Розробка 3D персонажа у стилі стімпанк передбачала ретельне опрацювання вибору стилю, композиції, колірної палітри та декоративних елементів, що дозволило створити впізнаваний і цілісний образ, дало змогу врахувати характер персонажа, стилістичні особливості стимпанку та принципи гармонійного поєднання матеріалів і деталей, а також є важливими кроками для створення персонажей. У процесі текстурування було виявлено, що прості, симетричні або великі поверхні накладаються відносно легко і без значних ускладнень, що забезпечує швидкий та ефективний робочий процес. Водночас складні елементи, такі як обличчя, дрібні механічні деталі та стики між окремими елементами, потребують більш детального та комбінованого підходу з використанням карт нормалей, процедурних ефектів і ручного малювання. Цей підхід дозволяє досягти високої деталізації, зберігаючи художню виразність персонажа та оптимізуючи навантаження на ігровий рушій. Разом із тим, робота з дрібними деталями вимагає значного часу та уваги, а також постійного контролю узгодженості текстур, щоб уникнути втрати стилістичної цілісності або появи неприродних ефектів. Високодеталізовані текстури створюють додаткове навантаження на ресурси гри, що потребує ретельної оптимізації. Таким чином, етап текстурування продемонстрував як переваги планування та правильного поєднання технологій, так і складнощі, пов’язані з деталізацією, які є важливим досвідом для практичного опрацювання 3D-моделей у геймдизайні.

Підготовка, тестування та оптимізація 2D текстур для моделі підтвердила важливість комплексного підходу. Було протестовано різні роздільні здатності карт, проведено корекцію кольору та текстурні шви, що забезпечило ефективне відтворення матеріалів у рендерингу без втрати деталей. Тож, UV-розгортка,

процедурне та ручне текстурування, змішування кольорів і деталізація дрібних елементів, а також застосування карт нормалей і спекулярних карт дозволяють отримати збалансований результат, що поєднує візуальну якість із технічною ефективністю.

Отже, виконане дослідження підтвердило, що текстурування 3D персонажів у стилі стімпанк є складним і багаторівневим процесом, що поєднує художні та технологічні аспекти. Виявлені технологічні особливості, методики та оптимізаційні підходи дозволяють створювати деталізовані, впізнавані та технічно оптимізовані моделі, що забезпечують художню цілісність ігрового світу. Результати роботи мають теоретичне та практичне значення, можуть використовуватися у навчальному процесі та професійній діяльності в сфері 3D-моделювання та геймдизайну.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Балицька Н., Мельничук П. Мікрофрезування, як спосіб текстурування поверхонь сплававів Ni-Ti для модифікації змочуваності. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, 2025. № 347.1. С. 478-485.
2. Галайко О. Теоретичні основи навчання тривимірній графіці у старших класах. *Сучасні інформаційні технології в освіті та науці* : зб. тез доп. VIII міжнар. наук.-техн. конф. (м. Житомир, 16-17 листопада 2023 р.). Житомир : ЖДУІФ, 2024. №1. С. 32-34.
3. Головань В. Г. Застосування технологій 3D моделювання в підготовці військових фахівців. *Актуальні проблеми в системі освіти: загальноосвітній заклад середньої освіти*. 2025. № 5. С. 279-289.
4. Головачук І. П. Воробчук М. С. Лелик Я. Р. Шмельов В. М. Роль 3D ілюстрації в оформленні дитячої книги : монографія. Київ : Київський національний університет технологій та дизайну, 2023. 12 с.
5. Графічні текстури – урок. Інформатика, 9 клас. *МійКлас*. URL: https://www.miyklas.com.ua/p/informatica/9-klas/trivimirna-grafika-360745/grafichni-teksturi-tekstovi-ob-yekti-ta-yikh-redaguvannia-351476/re-a35961e1-1172-4141-b1d1-7b921f219213 (дата звернення: 09.06.2025).
6. Гривняк А. Розробник Skeiron про фотограмметрію. *GameDev DOU*. 2023. URL: https://gamedev.dou.ua/blogs/skeiron-developer-about-photogrammetry (дата звернення: 09.06.2025).
7. Деркач А. С. Історія розвитку та сучасний стан 3D моделювання. *Науковий вісник Південноукраїнського національного педагогічного університету імені К. Д. Ушинського*. 2023. № 4(145). С. 7-13. URL: http://dspace.pdpu.edu.ua/handle/123456789/18600 (дата звернення: 09.06.2025).
8. Деркач А., Твердохліб І. Дослідження стану вивчення 3d-моделювання в закладах загальної середньої освіти України. *Проблеми сучасного*

підручника. 2024. № 33. С. 106-115. URL: https://doi.org/10.32405/2411-1309-2024-33-106-116 (дата звернення: 09.06.2025).

9. Клівак В. Особливості використання технології 3d-моделювання в робочому та навчальному процесі дизайнерів. *Актуальні питання гуманітарних наук. Мистецтвознавство*. 2021. Вип 45, № 1. С.68-75. DOI : 10.24919/2308-4863/45-1-11 (дата звернення: 09.06.2025).
10. Колесник Н. Є. Анімаційна графіка та motion дизайн : метод. матеріали. 2024. 40 с.
11. Колісник О. В., Білусяк А., Власюк В. Мистецтво та дизайн у 3D-графіці. Актуальні проблеми сучасного дизайну : зб. матеріалів XV Міжнар. наук.-техн. конф. Київ : КНУТД, 2022. № 2. С. 98-101 URL: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/21114/1/APSD_2022_V2_P098-101.pdf?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 09.06.2025).
12. Колумбія: пекельно райський куточок | ЛОР гри Bioshock Infinite. *Куток.* URL: https://kutok.io/__anomalypryt/kolumbiya_pekelno_raiskyi_kutochok_lor_hry_bioshock_infinite-25if (дата звернення: 09.06.2025).
13. Крук В. В. Волох Л. В. Використання фракталів у комп’ютерній графіці. *Інноватика в освіті, науці та бізнесі: виклики та можливості*. 2024. С. 92-97. URL: https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/29339 (дата звернення: 09.06.2025).
14. Лиша А. К. Розроблення сету 3D-моделей атрибутів комп'ютерної гри. *Актуальні питання та перспективи проведення наукових досліджень:* зб. тез доп. IX міжнар. студ. наук. конф. (м. Рівне, 30 травня 2025 рік). Вінниця: ТОВ «УКРЛОГОС Груп», 2025. – С. 410-411.
15. Матеріали та рендеринг OmniPBR. *Omniverse nvidia.* URL: docs.omniverse.nvidia.com/materials-and-rendering/latest/templates/parameters/OmniPBR_Albedo.html (дата звернення: 09.06.2025).

16. Мисник Л. Д., Капітан Р. Б., Мамонов Ю. П., Манзюра О. В. Основи теорії кольору : навч. посіб. Черкаси, 2020. 130 с.
17. Мошинець Д. Д. 3D-моделювання для створення короткометражного ролика : кваліф. роб. … магістра : 022 “Дизайн” / Запорізька політехніка. Запоріжжя, 2022. 89 с. URL: http://eir.zntu.edu.ua/handle/123456789/11043 (дата звернення: 09.06.2025).
18. Ніколаєв І. Д. Використання методів обробки зображень для оптимізації 3D-моделей у комп’ютерних іграх. *Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті* : зб. матеріалів XIX міжнар. наук.-техн. конф. (м. Харків, 16–19 квітня 2025 р.). Харків : ХНУРЕ, 2025. № 3. С. 315–317.
19. Обчислення на GPU: Сфери застосування. *Introserv*. URL: https://introserv.com/ua/blog/obchislennya-na-gpu-sferi-zastosuvannya/ (дата звернення: 09.06.2025).
20. Оникієнко Н. Ю. Застосування 3D-моделювання в медицині при підготовці до 3D-друку. *Електронна та Акустична Інженерія*. 2021. №4. С. 1-5. URL: https://doi.org/10.20535/2617-0965.eae.227387 (дата звернення: 09.06.2025).
21. Пальчевський Б. О. Валецький Б. П. Вараніцький Т. Л. Системи 3D моделювання : навч. посіб. Луцьк, 2016. 176 с.
22. Пантус Н. М., Золотарчук Н. І. Роль графічного дизайну у комп'ютерних поліграфічних дослідженнях: вплив дизайнерських рішень на виробництво та використання продукції. *Мистецтвознавчі записки*. 2023. №44. С. 18-27. URL: https://journals.uran.ua/mz/article/view/293907 (дата звернення: 09.06.2025).
23. Петреній О. М. Художні особливості цифрового живопису : кваліф. роб. … магістра : 023 «Образотворче мистецтво, декоративне мистецтво, реставрація». Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника. Івано-Франківськ, 2023. 113 с. URL : https://odpmr.cnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/16/2024/02/petrenij-o.-khudozhni-osoblyvosti-tsyfrovoho-zhyvopysu.pdf (дата звернення: 09.06.2025).

24. Пустюльга С. І. Самостян В. Р. Комп’ютерна інженерна графіка в SketchUP : навч. посіб. Луцьк : Вежа, 2021. 260 с.
25. Рішення з 3D-текстурування в Adobe Substance 3D. *Adobe*. URL: https://www.adobe.com/ua/products/substance3d/discover/3d-texturing.html (дата звернення: 09.06.2025).
26. Розробка концепт-арту характерного персонажа. *Arts series knukim*. URL: https://arts-series-knukim.pp.ua/article/view/318370?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 09.06.2025).
27. Романчук О. О. Лавренюк Я. В. Аналіз програмного забезпечення для вивчення 3D-моделювання. *Theoretical and Practical Aspects of Modern Research*: зб. матеріалів доп. учасн. XXVI міжнар. наук.-практ. конф. (м. Оттава, 5-7 червня 2024 р.). Канада : Оттава, 2024. С. 82-86.
28. Романюк О. Н., Новосельцев О. О., Мельник А. В., Майданюк В. П., Шевчук Р. П. Аналіз найпопулярніших пакетів прикладних программ для текстурування в галузі компютерної графіки. *Електронні інформаційні ресурси: створення, використання, доступ та управління* : зб. матеріалів міжнар. наук.-техн. конф. (м. Вінниця, 20-21 листопада 2024 р.). Вінниця: НІКО, 2024. С. 168-171.
29. Романюк О. Н., Новосельцев О. О., Романюк С. О. Особливості текстурування високої деталізації. *Креативний простір*, 2025. № 23. С. 53-55.
30. Романюк О. Н., Романюк О. В. Бази даних для задач текстурування тривимірних зображень. *Теоритичні та практичні аспекти розвитку науки та освіти* : зб. матеріалів XV міжнар. наук.-техн. конф. (м. Львів, 15-16 липня 2025 р.). Львів : Львівський науковий форум, 2025. С. 93-101.
31. Романюк О., Захарчук М. Метод процедурного текстурування. *Інноваційні дослідження та перспективи розвитку науки і техніки XXI століття*. : зб. матеріалів міжнар. наук.-техн. конф. (м. Рівне, 19 жовтня 2023 р.). Рівне, 2023. С. 175-178 с.

32. Станіславенко Є. Г. Текстурування при формуванні тривимірних персонажів. *Інформаційні технології і автоматизація* : зб. матеріалів доп. учасн. міжнар. наук.-техн. конф. (м. Одеса, 19 - 20 жовтня 2023 р.). Одеса: Видавництво ОНТУ, 2023. С. 448-450.
33. Стімпанк – стиль в сучасному мистецтві та його особливості. *Starosambir.* URL: https://starosambir.net.ua/6828/ (дата звернення: 09.06.2025).
34. Стімпанк – що це таке, визначення та в чому суть жанру і стилю. *Termin in ua*. URL: https://termin.in.ua/stimpank-steampunk/ (дата звернення: 09.06.2025).
35. Сушич О. В. Сучасні технології 3D моделювання. *Науковий простір Європи* : зб. матеріалів XIII міжнар. наук.-практ. конф. (м. Полтава, 2017 р.). Полтава : Полтавський державний медичний університет, 2017. С. 1-4.
36. Фадєєв Д., Филипович О., Бугайов В. Воля. Том 1 : Комікс. The Will Production. 2017. 54 с.
37. Храмова-Баранова Л. Л. Цифровий живопис: становлення та перспективи. *Культура і сучасність*. 2023. №1. С. 49-55. URL: https://journals.uran.ua/kis/article/view/286781?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 09.06.2025).
38. Хто такий 2D Artist. Про міфи, навички та напрямки професії. *Gamedev*. URL: https://gamedev.dou.ua/blogs/who-is-2d-artist-explanation/ (дата звернення: 09.06.2025).
39. Цифрові ігри LibreText. *Ukrayinska*. URL: https://ukrayinska.libretexts.org//Соціальні_науки/Комунікаційні_дослідження/Журналістика_та_масові_комунікації/Книга:_Медіа,_Суспільство,_Культура_і_Ви_(Poepsel)/01:_Глави/1.08:_Цифрові_ігри (дата звернення: 09.06.2025).
40. Чуб Л. О. Застосування 3D моделей у інтерактивних проєктах. *Поліграфічні, мультимедійні та web-технології* : зб. матеріалів VIII Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Харків, 16–20 травня 2023 року.). Харків : ТОВ «Друкарня Мадрид», 2023. С. 50-51.

41. Що таке застосування мап нормалей? *Adobe*. URL: https://www.adobe.com/ua/products/substance3d/discover/normal-mapping.html (дата звернення: 09.06.2025).
42. Що таке стимпанк-одяг та які його особливості. *Billibons.* URL: https://billibons.com.ua/ua/shcho-take-stympank-odyag-ta-yaki-jogo-osoblyvosti (дата звернення: 09.06.2025).
43. Як 3D-формат змінював кіноіндустрію у XX столітті. *SkvotMag.* URL: https://skvot.io/uk/blog/yak-3d-format-zminyuvav-kinoindustriyu-u-xx-stolitti (дата звернення: 09.06.2025).
44. Як сьогодні грається культова дилогія квестів "Сибірія" - Огляд Syberia I та II. *Кутюк.* URL: https://kutok.io/bohdander/yak_sohodni_hrayetsya_kultova_dylohiya_kvestiv_syberia_-oc0 (дата звернення: 09.06.2025).
45. 3D Texture Maps Explained. SEDDI Optical and Mechanical Science Teams. *Textura.ai.* 2023. URL: https://textura.ai/texture-maps-3d-models (дата звернення: 09.06.2025).
46. A Quick Look Back at the Games Created in Substance. *80.lv.* URL: https://80.lv/articles/a-quick-look-back-at-the-games-created-in-substance (дата звернення: 09.06.2025).
47. Adobe Acquires Allegorithmic, the Leader in 3D Editing and Authoring for Gaming and Entertainment. *Adobe*. URL: https://www.adobe.com/content/dam/cc/sea/newsroom/pdf/archive/2019/24Jan2019_%20AdobeAcquiresAllegorithmic_the_Leader_in_3D_Editing_and_Authoring_for_Gaming_and_Entertainment.pdf (дата звернення: 09.06.2025).
48. Akenine-Möller T., Haines E., Hoffman N. Real-Time Rendering (4th ed.). *CRC Press.* URL http://mutantstargoat.com/~nuclear/tmp/realtime_rendering_4ed.pdf (дата звернення: 09.06.2025).
49. Alberto Mielgo on His Animated Short “Jibaro” in Netflix’s ‘Love Death + Robots’. *Awardsdaily.* URL:

https://www.awardsdaily.com/2022/06/26/alberto-mielgo-on-his-animated-short-jibaro-in-netflixs-love-death-robots (дата звернення: 09.06.2025).

50. Beginner's guide to sculpting characters in clay. *3DTotal Publishing*. URL: https://store.3dtotal.com/products/beginners-guide-to-sculpting-characters-in-clay?srsltid=AfmBOoom8n14nCBOvvTENyab-yrktir00114E1sL1SvyfGaIBpjSC_dJ&utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 09.06.2025).
51. Blender NPR: Recreating the Genshin Impact Shader. *Artstation*. URL: https://www.artstation.com/blogs/bjayers/9oOD/blender-npr-recreating-the-genshin-impact-shader (дата звернення: 09.06.2025).
52. Boonsawang N., Motonobu K., Chanpum P. Optimizing Art and Technology in 3D Character Creation: Strategies for High-Fidelity Modeling and Resource Efficiency in Real-Time Environments. The 9th RSU International Research Conference (RSUCON-2024). Thailand : Rangsit University, 2024. 224 p.
53. Burley B. Extending the Disney BRDF to a BSDF with Integrated Subsurface *Scattering. 2015 Course Notes.* URL: https://www.yumpu.com/en/document/read/52806656/extending-the-disney-brdf-to-a-bsdf-with-integrated-subsurface-scattering (дата звернення: 09.06.2025).
54. Burley B. Physically Based Shading at Disney. *Walt Disney Animation Studios*. 2012. P. 1-27. URL: https://media.disneyanimation.com/uploads/production/publication_asset/48/asset/s2012_pbs_disney_brdf_notes_v3.pdf (дата звернення: 09.06.2025).
55. Catmull E. A subdivision algorithm for computer display of curved surfaces. PhD thesis, University of Utah. URL: https://ohiostate.pressbooks.pub/app/uploads/sites/45/2017/09/catmull_thesis.pdf (дата звернення: 09.06.2025).
56. Catmull E. E. A dissertation submitted to the Faculty of the University of Utah in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. *Department of Computer Science, University of Utah*. 1974. P. 1-84.

57. Cel-Shading by Sami "MENTAL" Hamlaoui. *Web archive*. URL: https://web.archive.org/web/20100107212021/http://www.gamedev.net/reference/articles/article1438.asp (дата звернення: 09.06.2025).
58. CGI у порівнянні з 3D-анімацією: дізнайтеся, в чому різниця. *Adobe.* URL: https://www.adobe.com/ua/products/substance3d/discover/uv-mapping.html (дата звернення: 09.06.2025).
59. Daiheng G. DART: Articulated hand model with diverse accessories and rich textures. *Advances in Neural Information Processing Systems.* 2022. № 2. P. 37055-37067.
60. Denham T. What is UV Mapping & Unwrapping? *Conceptartempire.* URL: https://conceptartempire.com/uv-mapping-unwrapping/ (дата звернення: 09.06.2025).
61. Dishonored. *Critical Distance*. URL: https://www.critical-distance.com/2020/09/02/dishonored/ (дата звернення: 09.06.2025).
62. Efros A. A., Freeman W. T. Image quilting for texture synthesis and transfer. *Seminal graphics papers: pushing the boundaries.* 2023. № 2. P. 571-576.
63. Epic Games Acquires Quixel, Creator of Megascans. Epic Games Press Release. *Unrealengine*. URL: https://www.unrealengine.com/en-US/blog/epic-games-and-quixel-join-forces-to-empower-creators (дата звернення: 09.06.2025).
64. Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M. Additive Manufacturing Technologies. *Springer International Publishing*. 2021. P. 1-607. URL: https://www.academia.edu/36183800/Additive_Manufacturing_Gibson (date of access: 09.06.2025).
65. GuiltyGear Xrd's Art Style: The X Factor Between 2D and 3DGuilty gear. *Ggxrd*. URL: https://www.ggxrd.com/Motomura_Junya_GuiltyGearXrd.pdf
66. High-Fidelity Stylized Lighting: Next-Gen Techniques for Studios. *Silvermonkey studio.* URL:

https://silvermonkey.studio/high-fidelity-stylized-lighting-next-gen-techniques (дата звернення: 09.06.2025).

67. How did wolfenstein do 3D graphics when 3D graphics couldn’t exist? *Retrocomputing* URL: https://retrocomputing.stackexchange.com/questions/30139/how-did-wolfenstein-do-3d-graphics-when-3d-graphics-couldnt-exist (дата звернення: 09.06.2025).
68. How Spider-Verse Changed Animation Forever (And Why It Matters). *Yourstory.* URL: https://yourstory.com/2025/04/spider-verse-changed-animation-forever (дата звернення: 09.06.2025).
69. Introduction: The Debate Over Arcane’s Animation Style. *Yelzkizi*. URL: https://yelzkizi.org/is-arcane-2d-or-3d/#:~:text=When%20Netflix’s%20Arcane%20hit%20the,drawn%202D%20artwork (дата звернення: 09.06.2025).
70. Kelly J. 3D Character Rigging in Blender: Rig Your Characters from Scratch to Give Them Life and Make Them Animation Ready. Packt Publishing, Limited, 2023. 162 p.
71. LibreTexts. 10.2: Еволюція електронних ігор. *Ukrayinska*. URL: https://ukrayinska.libretexts.org//Соціальні_науки/Комунікаційні_дослідження/Журналістика_та_масові_комунікації/Книга:_Масові_комунікації,_медіа_та_культура/10:_Електронні_ігри_та_розваги/10.02:_Еволюція_електронних_ігор (дата звернення: 09.06.2025).
72. Machinarium. *Google Play.* URL: https://play.google.com/store/apps/details/Machinarium?id=air.net.machinarium.Machinarium.GP&hl=uk (дата звернення: 09.06.2025).
73. Marschner S. R., Jensen H. W., Cammarano M., Worley S., Hanrahan P. Light Scattering from Human Hair Fibers. *ACM Transactions on Graphics*. 2003. № 22. P. 780-791 .URL: https://history.siggraph.org/learning/practical-real-time-hair-rendering-and-shading-by-scheuermann (дата звернення: 09.06.2025).

74. Mastering Megascans: A Guide to Photogrammetry and Asset Creation. *Dev epic games.* URL: https://dev.epicgames.com/community/learning/paths/yzG/unreal-engine-realityscan-mastering-megascans-a-guide-to-photogrammetry-and-asset-creation (дата звернення: 09.06.2025).
75. Montanuy O., Martin B., Quinet R., Wakelin J., Etherton D. The Most Unofficial Quake Technical Specification. 1996. URL: https://www.gamers.org/dEngine/quake/spec/quake-spec31.html (дата звернення: 09.06.2025).
76. Reversing Time: Throwback Analysis of "Dishonored," Part I. *With A Terrible Fate*. URL: https://withaterriblefate.com/2015/02/26/reversing-time-throwback-analysis-of-dishonored-part-i/ (дата звернення: 09.06.2025).
77. Rodriguez-Pardo C., Garces E. Seamlessgan: Self-supervised synthesis of tileable texture maps. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*. 2022. № 29. P. 2914-2925.
78. RTX Real-Time Ray Tracing Technology. *NVIDIA Developer*. URL: https://developer.nvidia.com/rtx/ray-tracing (дата звернення: 09.06.2025).
79. S.T.A.L.K.E.R. 2: Heart of Chornobyl, прес-анонс гри. *Alfa Server.* URL: https://alfa-server.com.ua/s.t.a.l.k.e.r.-2-heart-of-chornobyl-pres-anons-hry/ (дата звернення: 09.06.2025).
80. Schodl A. Video textures. Seminal Graphics Papers. *Pushing the Boundaries*. 2023. № 2. P. 557-570.
81. Shahbazi N. Exploring the World of 3D Textures: A Comprehensive Guide. 2025. *Pixune.* URL: https://pixune.com/blog/3d-texturing (дата звернення: 09.06.2025).
82. Silent Hill 2 безсмертна легенда та твоє персональне чистилище. *ITC.ua.* URL: https://itc.ua/ua/blogs/silent-hill-2-bezsmertna-legenda-ta-tvoye-personalne-chystylyshhe/ (дата звернення: 09.06.2025).

83. Staff P. Beginner's Guide to ZBrush. 3DTotal Publishing, 2017. 288 p.
84. Steampunk Game – Kaiser calls! *Play google*. URL: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.gameforge.xmobile.steampunk (дата звернення: 09.06.2025).
85. SteamWorld Dig. *Каталог української локалізації ігор.* URL: https://kuli.com.ua/steamworld-dig (дата звернення: 09.06.2025).
86. Stuart M., Adams B., Woolner M. Principles of Modelling and Rendering with 3D Studio. Intellect Books. 1998. 199 p.
87. Studying Hand-Painted Texturing Workflow for Stylized Art. *80.lv*. URL: https://80.lv/articles/studying-hand-painted-texturing-workflow-for-stylized-art (дата звернення: 09.06.2025).
88. Sullins S. 3D Artists Guide to Learning Low Poly Modeling in Blender: Learn to Create Low Poly Scenes, Characters and Assets to Kickstart Your 3D Career. Packt Publishing, Limited, 2023. 318 p.
89. Take a deep dive into Nanite GPU-driven. *Unrealengine*. URL: https://www.unrealengine.com/en-US/blog/take-a-deep-dive-into-nanite-gpu-driven-materials (дата звернення: 09.06.2025).
90. Tanenbaum J., Tanenbaum K., Wakkary R. Steampunk as Design Fiction. Article : Canada 2012. C. 1-10. URL: https://summit.sfu.ca/_flysystem/fedora/sfu_migrate/15220/2012_CHI_Steampunk_Tanenbaum_vy-edited.pdf (дата звернення: 09.06.2025).
91. Texture in 3D Art. *Kiriengine app*. URL: https://www.kiriengine.app/blog/texture-in-realistic-3d-art (дата звернення: 09.06.2025).
92. The Role of Architecture in Constructing Gameworlds: Intertextual Allusions, Metaphorical Representations and Societal Ethics in Dishonored. URL: https://www.erudit.org/en/journals/loading/2019-v12-n20-loading04974/1065898ar.pdf (дата звернення: 09.06.2025).
93. Unreal Engine 5 Documentation: Nanite Virtualized Geometry. *Dev epic games.* URL:

https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/nanite-virtualized-geometry-in-unreal-engine (дата звернення: 09.06.2025).

94. Unveiling the artistry of 3D texturing. CUDA. *Cada edu.* URL: https://cada-edu.com/guides/texturing (дата звернення: 09.06.2025).
95. What is a Normal Map? *Danthree studio.* URL: https://www.danthree.studio/en/glossary/normal-map (дата звернення: 09.06.2025).
96. What Is Anisotropic Filtering? Intel Gaming Resources. *Intel.* URL: https://www.intel.com/content/www/us/en/gaming/resources/what-is-anisotropic-filtering.html (дата звернення: 09.06.2025).
97. Why Netflix's Arcane looks so good: How Fortiche ramped up the animation pipeline. *Redshark news.* URL: https://www.redsharknews.com/why-netflixs-arcane-looks-so-good-how-fortiche-ramped-up-the-animation-pipeline (дата звернення: 09.06.2025).
98. Williams L. Pyramidal Parametrics. *Computer Graphics Laboratory*. 1983. 1-11 p.
99. Wright D., Narkowicz K. Lumen: Real-Time Global Illumination in Unreal Engine URL: https://advances.realtimerendering.com/s2022/SIGGRAPH2022-Advances-Lumen-Wright%20et%20al.pdf (дата звернення: 09.06.2025).
100. Xinrong M. H. Multi-stitch embroidery synthesis via region-aware texture generation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2024. № 31. P. 5334-5347.
101. Yurchenko A. 3D Textures: Digital Design’s New Trend. *Ilogos*. URL: https://ilogos.biz/3d-textures (дата звернення: 09.06.2025).
102. Chemerys H., Ponomarenko O., Kardashov V., Briantsev O. STEAM project based learning for future designers. AIP Conference Proceedings. 2022. № 2453. C. 030026 . URL: http://dx.doi.org/10.1063/5.0094432.
103. Чемерис Г. Ю., Осадча К. П. Добір засобів тривимірного моделювання для формування графічної компетентності майбутніх бакалаврів

комп'ютерних наук. Інформаційні технології і засоби навчання. 2017. Т. 6. № 62. С. 70-85. URL: https://journal.iitta.gov.ua/index.php/itlt/article/view/1713/1273.