

ЗАКЛАД ВИЩОЇ ОСВІТИ

**«УНІВЕРСИТЕТ КОРОЛЯ ДАНИЛА»
Факультет суспільних і прикладних наук
Кафедра архітектури та будівництва**

на правах рукопису

Сопилук Андрій Васильович

УДК 725

**“Алгоритми створення та методи аналізу архітектурних об’єктів у
віртуальній реальності”**

Спеціальність 191 – «Архітектура та містобудування»
Кваліфікаційна робота на здобуття кваліфікації магістр



Науковий керівник:

Савчук Андрій Іванович

кандидат архітектури,

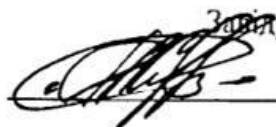
доцент кафедри архітектури

та будівництва

ЗВО «Університет Короля Данила»
Факультет суспільних і прикладних наук
Кафедра архітектури та будівництва
Освітній ступінь: «магістр»
Спеціальність: «191 Архітектура та містобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри



Жирак Р.М.

«13» лютого 2026 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТА**

Сопілюка Андрія Васильовича

1. Тема роботи: «Алгоритми створення та методи аналізу архітектурних об'єктів у віртуальній реальності»

Керівник роботи: Савчук Андрій Іванович, кандидат архітектури, доцент кафедри архітектури та будівництва

Затверджені наказом вищого навчального закладу від «27» 08 2025 року № 77/с.

2. Термін подання студентом роботи: 10.02.2026 року
3. Вихідні дані до роботи: генплан, ситуаційна схема, мапи-схеми, креслення, фото аналіз існуючої ситуації, наукова література за темою дослідження.
4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити):

ВСТУП: актуальність, мета, завдання, об'єкт та предмет дослідження; наукова новизна та практичне значення результатів.

РОЗДІЛ I. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД: аналіз розвитку VR-технологій в архітектурі та цифровій реконструкції; розгляд методології; психологія сприйняття; огляд програмних рішень і світового та українського досвіду.

РОЗДІЛ II. ПЕРЕДПРОЄКТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ: вибір інструментарію та програмного забезпечення для VR-сцени; дослідження моделювання архітектурних форм; аналіз методів оптимізації продуктивності; формування концепції реконструкції Успенського собору.

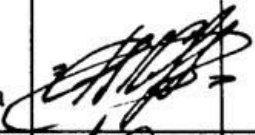

РОЗДІЛ III. ПРОЄКТНА ЧАСТИНА: опис створення геометрії та текстур історичної будівлі; імпорт в графічний рушій, налаштування матеріалів, освітлення й середовища; інтеграція об'єктів, реалізація VR-взаємодії, компіляція застосунку.

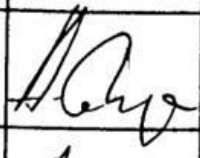

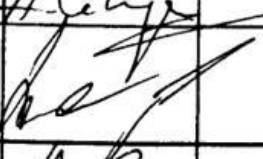

РОЗДІЛ IV. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЦИВІЛЬНИЙ ЗАХИСТ: основні вимоги охорони праці під час роботи з комп'ютерною технікою та VR-обладнанням; принципи інклюзивності й доступності VR-технологій; заходи цивільного захисту та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

ВИСНОВКИ

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): візуалізація; VR-застосунок.

6. Консультанти розділів роботи:

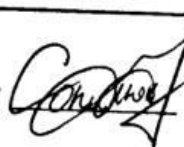
Розділ	Консультант (посада, ПІБ)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Вступ	Жирак Р.М. д. філософії, доцент кафедри архітектури та будівництва		
Розділ I	Савчук А.І. канд. арх.,		

	доцент кафедри архітектури та будівництва		
Розділ II	Савчук А.І. канд. арх., доцент кафедри архітектури та будівництва		
Розділ III	Савчук А.І. канд. арх., доцент кафедри архітектури та будівництва		
Розділ IV	Касіянчук В.Д. К.т.н., професор кафедри архітектури та будівництва		
Висновки	Савчук А.І. канд. арх., доцент кафедри архітектури та будівництва		

7. Дата видачі завдання: 03.09.2025

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	03.09 – 15.09	
2	Розділ I. Аналітичний огляд	16.09 – 09.10	
3	Розділ II. Передпроектні дослідження	10.10 – 05.11	
4	Розділ III. Проектна частина	06.11 – 19.01	
5	Розділ IV. Охорона праці, цивільний захист	20.01 – 21.01	
6	Підготовка до захисту	22.01 – 10.02	

Студент



(підпис)

Сопилук А.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи



(підпис)

Савчук А.І.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Метою дослідження магістерської роботи є проведення комплексного дослідження та розробка методології створення та аналізу архітектурних об'єктів у віртуальній реальності на основі інтеграції сучасних алгоритмів 3D-моделювання, оптимізації та візуалізації.

В першому розділі розглянуто аналіз сучасного стану та перспектив використання VR-технологій в архітектурі та збереженні історичної спадщини. Еволюція VR-технологій в архітектурі: від статичної візуалізації до інтерактивного середовища.

В другому розділі розглянуто дослідження інструментарію та вибір програмного забезпечення для реалізації VR-сцени. Вибір технологічного стеку для створення архітектурної візуалізації у віртуальній реальності є критичним стратегічним рішенням, що визначає не лише якість кінцевого продукту, а й ефективність робочого процесу, швидкість ітерацій та можливості масштабування проєкту.

Третій розділ представляє відтворення геометрії історичної будівлі Успенського собору. Використання ПЗ Blender як основного засобу моделювання. Процес безпосереднього моделювання архітектурного об'єкта базується на використанні програмного середовища Blender, що обране як основний інструментарій завдяки його потужним можливостям у роботі з полігональною топологією та гнучкості при створенні складних історичних реконструкцій.

В четвертому розділі розглянуто загальні положення про охорону праці. Охорона праці в Україні регулюється Законом України «Про охорону праці» від 14 жовтня 1992 року № 2694-ХІІ (в редакції від 12 вересня 2025 року), який визначає основні положення щодо реалізації конституційного права громадян на охорону їх життя і здоров'я у процесі трудової діяльності

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АНАЛІЗУ АРХІТЕКТУРНИХ ОБ'ЄКТІВ У ВІРТУАЛЬНІЙ РЕАЛЬНОСТІ, VR-ТЕХНОЛОГІЙ В АРХІТЕКТУРІ, VR-СЦЕНИ, ВИКОРИСТАННЯ ПЗ BLENDER ЯК ОСНОВНОГО ЗАСОБУ МОДЕЛЮВАННЯ, ОХОРОНА ПРАЦІ.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	5
ПЕРЕЛІК ТЕРМІНІВ ТА УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ I. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	12
1.1 Аналіз сучасного стану та перспектив використання VR-технологій в архітектурі та збереженні історичної спадщини	12
1.1.1 Еволюція VR-технологій в архітектурі: від статичної візуалізації до інтерактивного середовища	12
1.1.2 Методологія наукової віртуальної реконструкції: поєднання археології та VR-технологій	15
1.1.3 Психологія сприйняття та аналіз користувацького досвіду в архітектурному VR	17
1.1.4 Цифрова архівація та VR-фіксація історичної та архітектурної спадщини	19
1.2 Класифікація методів 3D-моделювання та алгоритмів візуалізації для віртуальних середовищ	23
1.2.1 Фундаментальні відмінності між CAD та ігровими рушіями	23
1.2.2 Алгоритми полігонального моделювання	29
1.2.3 Класифікація алгоритмів візуалізації: Растеризація та Трасування	31

1.3	Огляд існуючих програмних рішень та світового досвіду віртуальної реконструкції об'єктів	33
1.3.1	Соціальний та освітній аспект. Віртуальні музеї	33
1.3.2	Український досвід віртуальної реконструкції	36
РОЗДІЛ II. ПЕРЕДПРОЄКТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ		40
2.1	Дослідження інструментарію та вибір програмного забезпечення для реалізації VR-сцени	40
2.2	Особливості моделювання сучасних архітектурних форм на прикладі терміналу аеропорту.	42
2.2.1	Опис терміналу аеропорту. Підготовчі роботи	42
2.2.2	Моделювання та текстурування терміналу	44
2.3	Процес експортування з ArchiCad та оптимізація моделі на прикладі Галицького Замку	48
2.4	Методи оптимізації 3D об'єктів та текстур для забезпечення високої продуктивності у VR.	53
2.4.1	Важливість оптимізації 3D середовища та основні принципи	53
2.4.2	LOD та Draw Call	55
2.4.3	Важливість збереження чіткості текстур та використання ефективних методів	56
2.5	Робота над концепцією реконструкції Успенського собору	58
РОЗДІЛ III. ПРОЄКТНА ЧАСТИНА		60
3.1	Відтворення геометрії історичної будівлі Успенського собору	60
3.1.1	Використання ПЗ Blender як основного засобу моделювання	60
3.1.2	Запікання та текстурування плитки із зображенням грифонів	63
3.1.3	Скульптинг барельєфу із зображенням дракона	64

3.2 Імпорт у Unreal Engine. Налаштування візуального середовища собору: матеріали, шейдери та алгоритми освітлення.	66
3.3 Інтеграція другорядних об'єктів в середовищі собору	69
3.4 Реалізація інтерактивної взаємодії користувача	71
3.5 Компіляція VR застосунку та процес тестування	73
РОЗДІЛ IV. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЦИВІЛЬНИЙ ЗАХИСТ	75
4.1 Загальні положення про охорону праці	75
4.2 Специфічні вимоги охорони праці при використанні VR-окулярів	75
4.3 Інклюзивність та доступність VR-технологій	78
4.4 Цивільний захист	80
ВИСНОВКИ	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	83

ПЕРЕЛІК ТЕРМІНІВ ТА УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

VR – віртуальна реальність

ПЗ – програмне забезпечення

CAD – Computer-Aided Design, системи автоматизованого проектування

AEC – Architecture, Engineering, and Construction, архітектура, інжиніринг та будівництво

PBR – Physically Based Rendering, фізично коректний рендеринг

LOD – Level of Detail, рівень деталізації

FPS – Frames Per Second, кількість кадрів за секунду

UV-розгортка – система координат для накладання текстур на 3D-моделі

Ray-Tracing – трасування променів, метод візуалізації для реалістичного освітлення

Растеризація – метод візуалізації на основі проєкції полігонів

Draw Call – виклик відображення, операція передачі геометрії на відеокарту

Полігональне моделювання – створення 3D-моделей з багатокутників

Процедурне моделювання – автоматизоване створення геометрії за алгоритмами

Ретопологія – процес оптимізації топології 3D-моделі

Скульптинг – цифрове моделювання методом віртуальної скульптури

Запікання текстур – процес перенесення деталей з високополігональної моделі на текстуру

Шейдер – програма, що визначає візуальні властивості поверхонь

Фотограмметрія – техніка створення 3D-моделей з фотографій

Імерсивність – ефект повного занурення користувача у віртуальне середовище

ВСТУП

Сучасний етап розвитку архітектури характеризується активною інтеграцією цифрових технологій у процеси проєктування, візуалізації та збереження архітектурної спадщини. Технології віртуальної реальності відкривають принципово нові можливості для просторового аналізу архітектурних об'єктів, створення науково обґрунтованих віртуальних реконструкцій історичних споруд та формування інноваційних методів представлення архітектурної інформації. Особливої важливості набуває застосування VR-технологій у контексті збереження та популяризації історико-архітектурної спадщини, зокрема об'єктів, що зазнали руйнувань або втрачені внаслідок історичних подій.

Процес створення архітектурних VR-середовищ вимагає комплексного підходу, що поєднує традиційні методи архітектурного проєктування з сучасними алгоритмами 3D-моделювання та візуалізації. Фундаментальні відмінності між системами автоматизованого проєктування (CAD) та ігровими рушіями визначають специфіку робочого процесу та потребують розробки ефективних методів конвертації та оптимізації архітектурних моделей. Алгоритми полігонального моделювання та растеризації освітлення формують технологічний базис для створення реалістичних віртуальних просторів, придатних для інтерактивного дослідження в режимі реального часу.

Сучасна методологія віртуальної реконструкції історичних об'єктів ґрунтується на міждисциплінарному синтезі археологічних досліджень, архівних матеріалів, архітектурного аналізу та цифрових технологій. Використання VR-технологій дозволяє не лише відтворити зовнішній вигляд втрачених споруд, але й забезпечити можливість віртуального перебування в історичному просторі, що сприяє глибшому розумінню архітектурної композиції, масштабу та взаємозв'язків між елементами будівлі. Психологія сприйняття та аналіз користувацького досвіду

відіграють ключову роль у розробці ефективних VR-середовищ, що забезпечують високий рівень присутності та занурення користувача.

Технічні аспекти створення VR-середовищ охоплюють широкий спектр завдань, від вибору оптимальних методів 3D-моделювання до розробки ефективних алгоритмів візуалізації та оптимізації продуктивності. Проблема забезпечення високої кадрової частоти (мінімум 90 FPS для комфортного VR-досвіду) при збереженні візуальної якості потребує застосування спеціалізованих методів оптимізації, включаючи системи рівнів деталізації (LOD), ефективне управління викликами малювання (Draw Calls) та оптимізацію текстур. Особливу увагу необхідно приділяти балансу між точністю історичної реконструкції та технічними обмеженнями VR-платформ.

Соціальний та освітній потенціал VR-технологій в архітектурі реалізується через створення віртуальних музеїв, інтерактивних освітніх платформ та інструментів для дистанційного ознайомлення з об'єктами культурної спадщини. Український досвід віртуальної реконструкції демонструє зростаючий інтерес до збереження національної архітектурної спадщини засобами цифрових технологій, що актуалізує необхідність розробки методичних рекомендацій та стандартів для створення науково обґрунтованих віртуальних реконструкцій.

Метою роботи є проведення комплексного дослідження та розробка методології створення та аналізу архітектурних об'єктів у віртуальній реальності на основі інтеграції сучасних алгоритмів 3D-моделювання, оптимізації та візуалізації.

Завдання роботи:

- 1) Провести аналітичний огляд сучасного стану VR-технологій в архітектурі та методології наукової віртуальної реконструкції;
- 2) Класифікувати методи 3D-моделювання та алгоритми візуалізації для віртуальних середовищ;

- 3) Дослідити інструментарій та обґрунтувати вибір програмного забезпечення для реалізації VR-сцен;
- 4) Визначити специфіку моделювання різних типів архітектурних форм та методи експортування з САД-систем;
- 5) Розробити методи оптимізації 3D-об'єктів та текстур для забезпечення високої продуктивності у VR;
- 6) Реалізувати практичний проєкт віртуальної реконструкції історичного об'єкта з інтеграцією інтерактивних елементів.

Об'єкт дослідження: архітектурні об'єкти у віртуальному просторі.

Предмет дослідження: алгоритми 3D-моделювання, методи оптимізації та візуалізації архітектурних форм у середовищі віртуальної реальності.

Методи дослідження: У кваліфікаційній роботі було застосовано комплекс методів, що включає аналітичний огляд наукової літератури та існуючих програмних рішень, порівняльний аналіз алгоритмів 3D-моделювання та візуалізації, експериментальне дослідження методів оптимізації продуктивності VR-середовищ, практичне моделювання та реконструкцію архітектурних об'єктів з використанням програмного забезпечення ArchiCAD, Blender та Unreal Engine.

Структура роботи: кваліфікаційні робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загального висновку, списку використаних джерел та додатків. Кількість сторінок всіх розділів – 82. Список використаних джерел на 7 сторінках. Загальний обсяг роботи включно зі списком використаних джерел – 90 сторінок.

РОЗДІЛ I. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Аналіз сучасного стану та перспектив використання VR-технологій в архітектурі та збереженні історичної спадщини

1.1.1 Еволюція VR-технологій в архітектурі: від статичної візуалізації до інтерактивного середовища

Архітектурна індустрія переживає фундаментальну трансформацію у способах проєктування, презентації та взаємодії з простором. Технологія віртуальної реальності (VR) є одним із джерел цих змін, перетворюючи традиційний підхід від статичних 3D-візуалізацій до повноцінних інтерактивних середовищ, де архітектори, клієнти та зацікавлені сторони можуть досліджувати проєкти ще до початку будівництва. Ця еволюція відображає не лише технологічний прогрес, а й принципову зміну парадигми архітектурного проєктування від пасивного споглядання до активного занурення та співпраці.

Протягом останнього десятиліття VR-технології демонструють експоненційне зростання в секторі архітектури, інжинірингу та будівництва. За даними аналітичних досліджень, глобальний ринок архітектурного програмного забезпечення зростає зі швидкістю 14,7% річно, досягнувши обсягу \$14,8 млрд у 2024 році з прогнозом \$32,1 млрд до 2033 року [1]. Пандемія COVID-19 стала переломним моментом для прискорення впровадження AR/VR технологій: використання віртуальної реальності в бізнесі зросло з \$829 млн у 2018 році до прогнозованих \$4,26 млрд у 2023 році [2]. Цей ріст обумовлений не лише технологічними інноваціями, а й необхідністю віддаленої співпраці та цифровізації робочих процесів.

Зокрема, у 2025 році дев'ять із двадцяти провідних архітектурних бюро світу активно використовують VR у своїх проєктних процесах [3]. Це свідчить про перехід технології від експериментального інструменту до

стандартної практики галузі. Більш широкий ринок віртуальної реальності демонструє вражаючу динаміку: оцінений у \$28,78 млрд у 2023 році, він прогнозується на рівні \$192,99 млрд до 2030 року [4], з архітектурою та плануванням як одним із ключових секторів застосування.

Провідні світові архітектурні бюро стали піонерами впровадження VR-технологій. Zaha Hadid Architects створило спеціалізовану групу Zaha Hadid Virtual Reality Group ще у 2014 році, що свідчить про стратегічне бачення потенціалу технології. Станом на 2025 рік ZHA активно використовує VR на всіх етапах проектування — від концептуальної оцінки дизайну до фінальних презентацій клієнтам, інтегруючи 3D-моделі з віртуальною реальністю для створення кіберпросторів та метавсесвітів [5]. У виставці «Architecture of Possibility» у Шеньчжені (грудень 2025 - квітень 2026) ZHA демонструє, як платформи на базі відеоігрових технологій дозволяють архітекторам, клієнтам та зацікавленим сторонам віртуально досліджувати та налаштовувати архітектурні простори в режимі реального часу [6]. ZHVR фокусується на трьох ключових напрямках: використанні VR як інструменту проектування, дослідженні формального естетичного потенціалу віртуального простору та розробці імерсивних інструментів моделювання.

Аналогічно, Bjarke Ingels Group (BIG) активно інвестує у віртуальні технології, створивши у 2021 році разом з UNStudio платформу SpaceForm для віртуальної співпраці [7]. BIG також розробило програмне забезпечення з доповненою реальністю Hyperform у співпраці з Squint/Opera та UNStudio, що дозволяє дизайнерам та клієнтам «відчувати просторові умови до їх побудови» та редагувати проекти в режимі реального часу жестами рук [8]. Ці інвестиції демонструють, що провідні фірми розглядають VR не як допоміжний інструмент, а як стратегічну технологію для трансформації проектних процесів.

Перехід від статичної 3D-візуалізації до інтерактивного VR-середовища означає докорінну зміну в архітектурній практиці. Традиційні 2D-креслення та статичні 3D-рендери мають обмеження у передачі просторового досвіду, що часто призводить до непорозумінь між архітекторами та клієнтами. Віртуальна реальність вирішує цю проблему, дозволяючи користувачам буквально «ходити» всередині проєкту, досліджувати кожен деталь та приймати рішення на місці — ще до початку будівництва. Це радикально скорочує час на прийняття рішень, зменшує кількість дорогих змін на пізніх етапах проєктування та покращує розуміння проєкту всіма зацікавленими сторонами.

Ключовою перевагою VR є можливість раннього виявлення та виправлення помилок, що економить час та кошти [9]. За прогнозами, впровадження технологій віртуального проєктування та цифрових двійників у секторі архітектури призведе до економії \$950 млн на етапах проєктування та будівництва та \$400 млн на етапах експлуатації та обслуговування в нежитловому будівництві до 2025 року [10]. Ці цифри підкреслюють не лише технологічний, а й економічний потенціал VR-технологій в архітектурі.

Однак широке впровадження VR все ще стримується певними бар'єрами. Згідно з дослідженням Vectorworks (2025), основною перешкодою для впровадження цифрових трендів в АЕС є брак навчання, а для AR/VR технологій це необхідність значних інвестицій у спеціалізоване обладнання, програмне забезпечення та потужні комп'ютерні системи [11]. Тим не менш, з підвищенням доступності технології та зниженням вартості обладнання ці бар'єри поступово зникають, що сприяє більш широкому впровадженню VR у галузі.

Перспективи розвитку VR в архітектурі виглядають надзвичайно обнадійливо. Інтеграція штучного інтелекту з VR-платформами створює персоналізовані середовища, що динамічно адаптуються до реакцій

користувачів, особливо в освітній та ігровій сферах [12]. Нові автономні пристрої з покращеними можливостями батареї та обробки розширюють доступність VR для архітектурних бюро будь-якого розміру. Систематичний огляд еволюції та дослідницьких трендів VR/AR технологій в архітектурній індустрії за 2015-2025 роки показує експоненційне зростання публікацій, що підкреслює активний розвиток галузі [13].

Отже, еволюція VR-технологій в архітектурі представляє собою не просто зміну інструментарію, а фундаментальну трансформацію галузі. Від перших експериментів із статичною візуалізацією до повноцінних інтерактивних середовищ, що інтегрують штучний інтелект, BIM та цифрові двійники, ця технологія перетворює спосіб, яким ми проєктуємо, будуємо та досліджуємо архітектурні простори. З постійним зростанням ринку, розширенням функціональності та зниженням бар'єрів входу, VR стає невід'ємною частиною майбутнього архітектури, де межа між фізичним та цифровим простором стає дедалі більш прозорою.

1.1.2 Методологія наукової віртуальної реконструкції: поєднання археології та VR-технологій

Наукова віртуальна реконструкція археологічних об'єктів є міждисциплінарною методологією, що поєднує археологічні дані, історичні джерела, архітектурний аналіз та сучасні технології цифрового моделювання. Ця практика вимагає строгого дотримання наукових стандартів та етичних принципів, оскільки віртуальна реконструкція може як розширити наше розуміння минулого, так і створити хибні уявлення про нього. Для регулювання цієї діяльності міжнародна спільнота розробила два фундаментальні документи: Хартію Лондонську (London Charter, 2009) та Севільські принципи (Seville Principles, 2011), які визначають стандарти

інтелектуальної чесності, прозорості та наукової строгості у віртуальній візуалізації культурної спадщини [14].

Хартія Лондонська, прийнята у лютому 2009 року, встановлює міжнародно визнані принципи комп'ютерної візуалізації культурної спадщини. Документ еволюціонував від початкового фокусу на 3D-візуалізації до ширшого охоплення усіх форм комп'ютерної візуалізації, включаючи 2D, 3D та навіть фізичні репліки, створені комп'ютером (London Charter, 2009). Хартія визначає вісім ключових принципів: реалізація, цілі та методи, джерела, документація, стійкість, доступ, прозорість та підготовка. Центральною вимогою є забезпечення того, щоб процеси та результати комп'ютерної візуалізації могли бути належним чином зрозумілі та оцінені користувачами, а не покладатися виключно на «авторитетні твердження» авторів [15]. Хартія підкреслює важливість прозорості як ключової умови для того, щоб такі застосування дозріли як дослідницький метод та отримали широке визнання в наукових спільнотах.

Севільські принципи, розроблені у 2011 році Міжнародним форумом віртуальної археології та Іспанським товариством віртуальної археології (SEAV), доповнюють Лондонську хартію, пристосовуючи її загальні принципи до специфічних потреб віртуальної археології [16]. Документ базується на восьми фундаментальних теоретичних засадах: міждисциплінарність, цілеспрямованість, комплементарність, автентичність, історична точність, ефективність, наукова прозорість, навчання та оцінка [17]. Севільські принципи наголошують, що всі проекти комп'ютерної візуалізації археологічної спадщини повинні бути доступними, здатними до тестування іншими дослідниками, оскільки достовірність висновків залежить від можливості підтвердження або спростування результатів.

Методологія наукової віртуальної реконструкції складається з чотирьох фундаментальних етапів: обстеження, документування, обробка даних та створення реконструктивної гіпотези [18]. На етапі обстеження застосовуються різноманітні методи цифрової фіксації: фотограмметрія, лазерне сканування, наземне та повітряне LIDAR-сканування, що дозволяють отримати високоточні 3D-моделі існуючих залишків. Етап документування передбачає збір усіх доступних джерел: археологічних звітів, історичних креслень, фотографій розкопок, описів сучасників, аналогічних об'єктів та іконографічних матеріалів. Кожне джерело має бути критично оцінене щодо його надійності, повноти та якості [19].

Ключовою інновацією сучасної методології є концепція «параданих» — детальної документації процесу прийняття рішень під час створення віртуальної реконструкції. Це включає пояснення того, як реконструкція була виведена з джерел, які альтернативні інтерпретації були розглянуті, і чому була обрана саме ця версія [20]. Методологія RAM (Reconstruction Argumentation Method) розділяє об'єкт на різні просторові зони та часові періоди, кожна з яких містить репрезентацію реконструкції, використані джерела та текстуальну аргументацію, що пояснює, як реконструкція була виведена [19]. Залежно від доступності та якості архівних матеріалів, ступінь достовірності реконструкції може драматично відрізнятися, що вимагає чіткої візуалізації рівнів невизначеності.

Станом на 2025 рік методологія значно вдосконалена завдяки інтеграції штучного інтелекту. Проєкт ARCHER (Virtual Reconstruction of Architectural Cultural Heritage through Artificial Intelligence and Natural Language Processing, 2022-2025) демонструє парадигмальний зсув у автоматичній віртуальній реконструкції історичних будівель через глибоке навчання та обробку природної мови [21]. Сучасні алгоритми комп'ютерного зору дозволяють отримувати 3D-реконструкції навіть з одиничних зображень, використовуючи великі набори анотованих даних

для передбачення глибини об'єктів [22]. Методи на основі Gaussian Splatting та NeRF (Neural Radiance Fields) революціонізують 3D-реконструкцію, пропонуючи швидкість та якість, що перевершують традиційні підходи.

1.1.3 Психологія сприйняття та аналіз користувацького досвіду в архітектурному VR

У наукових дослідженнях проблеми того, як людина сприймає масштаб і простір у віртуальній реальності в порівнянні з реальним середовищем, основну увагу приділено феномену просторової присутності, точності оцінювання відстаней і розмірів, а також нейрофізіологічним і поведінковим механізмам, що визначають такі сприйняття. Ці питання розглядаються в межах когнітивної науки, ергономіки, психології сприйняття та досліджень інтерфейсів людина-комп'ютер [23].

У VR-дослідженнях широко застосовуються кількісні експериментальні методи, що поєднують психофізичні тести, опитувальні шкали та поведінкові завдання. Одним із прикладів є використання стандартизованої Spatial Presence Experience Scale (SPES) для оцінки інтенсивності відчуття присутності в просторі віртуального середовища. У подібних експериментах учасники після взаємодії з VR-сценами оцінюють ступінь «відчуття того, що вони «там», у віртуальному просторі», що дозволяє порівнювати вплив різних технологічних і когнітивних факторів на сприйняття простору. Дослідження показують позитивну кореляцію між кількістю можливих дій у VR та рівнем просторової присутності, що підкреслює значення інтерактивності середовища для сприйняття простору [24].

Ще один підхід базується на психофізичних тестах сприйняття масштабу і відстаней: учасники оцінюють довжину, висоту або відстань

між об'єктами у віртуальному середовищі, а ці оцінки порівнюють із відповідними вимірами в реальному світі або з еталонними величинами. Наприклад, кілька досліджень демонструють, що абсолютна відстань у VR часто недооцінюється порівняно з реальними умовами, що має наслідки для застосувань у дизайні й архітектурі, де точне відчуття масштабу критично важливе [25]. Крім того, на сприйняття простору впливають наявність орієнтирів і просторових підказок: коли у VR-сцені присутні знайомі об'єкти людського масштабу, точність оцінювання розмірів поліпшується, що підкреслює роль контекстуальних сигналів для коректного просторового сприйняття [23].

Для оцінки елементів присутності на нейрофізіологічному рівні застосовують методи реєстрації активності мозку, такі як електроенцефалографія (EEG). У таких дослідженнях порівнюють реакції учасників у різних VR-системах (наприклад, між системами з високою та низькою іммерсивністю) під час навігаційних завдань у віртуальному просторі. Аналіз змін у частотних діапазонах EEG дозволяє відстежувати кореляцію між відчуттям присутності та активністю певних областей кори головного мозку, що відкриває перспективи для об'єктивної нейрофізіологічної оцінки VR-сприйняття [26].

Крім психофізичних і нейрофізіологічних підходів, у дослідженнях просторового сприйняття у VR широко використовуються структурно-когнітивні моделі, що враховують вплив перспективи, поля зору, бінокулярного зору, проекційної геометрії та типів пристроїв відображення. Експерименти, в яких змінюють центр проекції, спосіб перегляду (моно- vs. бінокулярний) і розмір екрана, демонструють значний вплив цих параметрів на сприйняття планування простору та відчуття присутності [27].

Методи аналізу також включають порівняння реакцій на динамічні й статичні VR-середовища, що дозволяє дослідникам оцінювати, як рух і

анімація змінюють відчуття просторової присутності та викликають симптоми кібернетичної хвороби. У таких дослідженнях застосовують як суб'єктивні оцінки, так і стандартні опитувальники для фіксації фізіологічних і емоційних реакцій учасників [28].

Важливо, що сучасна література також розробляє нові шкали і моделі присутності, які прагнуть узгодити різні складові цього феномену — від технічної чіткості до когнітивних і афективних аспектів переживання VR. Такі моделі допомагають стандартизувати інструменти оцінювання та створювати більш зрозумілі методики для порівняння результатів між дослідженнями [29].

1.1.4 Цифрова архівація та VR-фіксація історичної та архітектурної спадщини

У контексті зростаючих загроз для світової культурної спадщини, від збройних конфліктів та природних катастроф до кліматичних змін та урбанізації, технології віртуальної реальності набувають критичного значення як інструмент превентивного збереження. Цифрове документування архітектурних пам'яток через високоточне 3D-сканування створює цифрові архіви, які виконують подвійну функцію: забезпечують страховий резерв на випадок фізичного знищення об'єкта та формують науково обґрунтовану базу для майбутньої реставрації чи реконструкції. Ця парадигма превентивного збереження набула особливої актуальності після 2022 року, коли повномасштабна війна в Україні поставила під загрозу тисячі об'єктів архітектурної та культурної спадщини, стимулювавши безпрецедентну мобілізацію міжнародних зусиль щодо їхньої цифровізації.

У серпні 2023 року ЮНЕСКО разом з ICOMOS та ICCROM запустили спільний проєкт «Підтримка України в освіті та культурі через ЮНЕСКО», фінансований Японією, з метою підвищення кваліфікації

українських фахівців з охорони спадщини та цифрового збереження об'єктів Всесвітньої спадщини ЮНЕСКО [30]. Команди експертів здійснили місії у 2023 та 2024 роках для сканування церков та театрів за допомогою 3D LiDAR-сканерів Leica BLK360, навчаючи українських професіоналів технологіям документування, щоб робота могла тривати після завершення проєкту. Точні хмари точок виявилися особливо корисними для оцінки структурного впливу конфлікту, зокрема для театру, фундамент якого було пошкоджено внаслідок ракетних атак.

Паралельно з офіційними ініціативами розвинулися краудсорсингові платформи, що демократизують процес цифрового збереження. Ініціатива «Backup Ukraine» дозволяє будь-якій особі стати архіваріусом за допомогою додатка Polycam, який уможливорює створення 3D-моделей будівель та пам'ятників з використанням мобільних телефонів, DSLR-камер та навіть дронів [31]. Станом на 2022 рік близько 6000 користувачів застосували мобільний додаток для архівування 3D-моделей пам'ятників та історичних об'єктів [32]. Додаток забезпечує безкоштовний доступ до технології сканування без необхідності спеціального навчання, а отримані скани можуть бути завантажені та збережені онлайн у постійному цифровому архіві. Львівський архітектор та блогер Юліан Чаплінський ініціював збір коштів для створення цифрових копій численних історичних пам'ятників, що розташовані в центрі Львова, об'єкті Всесвітньої спадщини ЮНЕСКО, розуміючи, що ця технологія може допомогти в їхній реставрації у разі обстрілу [33].

Концепція краудсорсингової фотограмметрії набула широкого визнання як метод відновлення вже зруйнованих об'єктів. Піонерським прикладом стала реконструкція Будд Баміану, зруйнованих Талібаном у березні 2001 року: ETH Zürich розпочав фотограмметричну реконструкцію на основі декількох наборів даних, деякі з яких були отримані для дослідницьких цілей, а інші — туристами [34]. Хоча зображення

дозволили отримати досить точні реконструкції великих елементів, дрібніші деталі могли не з'явитися в остаточній цифровій моделі через якісні обмеження аматорських фотографій. Після руйнування об'єктів у Мосульському музеї силами ІДІЛ у лютому 2015 року була запущена ініціатива Project Mosul (згодом перейменована в Rekrei), яка збирала краудсорсингові зображення для створення 3D-репрезентацій зруйнованих артефактів [35]. Волонтери збирали зображення з інтернету, допомагали з маскуванням об'єктів на завантажених зображеннях для покращення фінального кроку фотограмметричної реконструкції, і проєкт швидко розширився на Сирію, Єгипет, Ємен та, після землетрусу у квітні 2015 року, Непал.

Важливим прикладом є реконструкція храму Бел у Пальмірі, частково зруйнованого ІДІЛ у серпні 2015 року, яка була здійснена в рамках проєкту Curious Travellers за підтримки AHRC з використанням туристичних фотографій [36]. Проєкт використовував технології big data у поєднанні з Structure-from-Motion (SfM) для реконструкції моделей. Основною проблемою краудсорсингових зображень є різноманітність камер, часу доби та цілей фотографування, що може спричинити непослідовності у фінальній моделі.

Міжнародна організація CyArk, заснована у 2003 році Беном Качирою після руйнування Будд Баміяну, стала глобальним лідером у цифровому збереженні культурної спадщини. Місія CyArk полягає у «збереженні об'єктів Всесвітньої спадщини через збирання, архівування та надання відкритого доступу до даних, створених лазерним скануванням, цифровим моделюванням та іншими передовими технологіями» [37]. Організація використовує методологію, що інтегрує дані з LiDAR-пристроїв з наземною та повітряною фотограмметрією, створюючи фототекстуровані 3D-меші з роздільністю до міліметра. Станом на липень 2025 року CyArk співпрацює з понад 55 командами з дослідницьких

лабораторій, установ охорони спадщини та університетів [38], надаючи тренінги та навчальні семінари для підвищення кваліфікації місцевих фахівців. В рамках ініціативи Open Heritage організація надає безкоштовний доступ до багатьох зібраних наборів даних під ліцензіями Creative Commons для повторного використання в освіті, дослідженнях та некомерційних цілях.

Для довгострокового зберігання гігантських обсягів 3D-даних критичне значення мають хмарні репозиторії та спеціалізовані платформи. Sketchfab, найбільша платформа для публікації та пошуку 3D-контенту, станом на квітень 2024 року налічує понад 100 000 моделей у категорії «Культурна спадщина та історія», хоча реальна кількість, з урахуванням некатегоризованих моделей, може бути значно вищою [39]. З 2015 року Sketchfab підтримує програму Cultural Heritage, надаючи безкоштовні підписки сотням організацій та проєктів. У 2023 році платформа запровадила можливість присвяти 3D-моделей суспільному надбанню через Creative Commons Public Domain Dedication (CC0) у співпраці з 27 культурними організаціями з 13 країн, включаючи Смітсонівський інститут. Global Digital Heritage, некомерційна організація, розмістила понад 5000 моделей культурної спадщини на Sketchfab протягом чотирьох років, базуючись на проєктах у 10 країнах [40].

Технічні виклики довгострокового збереження 3D-даних вимагають дотримання міжнародних стандартів та принципів. Згідно з дослідженням 2024 року, ключові аспекти включають технологічне застарівання, управління метаданими та дотримання принципів FAIR (знахідність, доступність, сумісність та можливість повторного використання) [41]. Довгострокове збереження 3D-даних потребує дотримання моделі Open Archival Information System (OAIS), міжнародного стандарту цифрового збереження, що визначає структуру та функції репозиторію, забезпечуючи цілісність та доступність даних з часом [42]. Метадані збереження повинні

включати не лише опис об'єкта (назва, творець, історія), а й технічні деталі (налаштування зйомки, формат файлу, історія версій) та виконані дії збереження (міграції, перевірки контрольних сум). Файли мають зберігатися на географічно розподілених, резервних системах та періодично мігрувати до нових форматів або носіїв для уникнення застарівання.

Національні ініціативи також відіграють важливу роль. Французький консорціум «3D for Digital Humanities», заснований у 2014 році, станом на жовтень 2025 року об'єднує понад 55 команд з дослідницьких лабораторій, установ охорони спадщини та університетів [43]. Національний репозиторій 3D-даних (CND3D) консорціуму налічує сотні ретельно курованих наборів даних з більш ніж 20 установ. Проєкт собору Нотр-Дам після пожежі 2019 року став одним з найяскравіших прикладів, де масштабні зусилля з цифровізації підтримують реконструкцію, наукові аналізи та довгострокове збереження, з підготовкою архівування 3D-моделей у CINES за допомогою програмного забезпечення aLTAG3D. У світі, де культурна спадщина стає дедалі вразливішою, віртуальна реальність виступає не лише технологічним інструментом, а й актом колективної пам'яті та відповідальності перед майбутнім.

1.2 Класифікація методів 3D-моделювання та алгоритмів візуалізації для віртуальних середовищ

1.2.1 Фундаментальні відмінності між CAD та ігровими рушіями

Технології тривимірного моделювання для віртуальної реальності представляють собою складну екосистему методів, інструментів та підходів, що еволюціонували з різних галузей від інженерного проєктування до індустрії розваг. Ключовий поділ у цій сфері лежить між двома парадигмами представлення геометрії: параметричним моделюванням у системах автоматизованого проєктування (CAD) та

полігональним моделюванням в ігрових рушіях. Ці підходи, хоча й спрямовані на створення цифрових репрезентацій тривимірних об'єктів, базуються на принципово різних математичних основах, оптимізовані для діаметрально протилежних цілей та вимагають різних робочих процесів для підготовки контенту для віртуальної реальності. Розуміння цих відмінностей є критично важливим для архітекторів та дизайнерів, які прагнуть ефективно використовувати VR-технології у своїй практиці, оскільки вибір невідповідного методу моделювання може призвести до неприйнятної продуктивності системи або втрати архітектурної точності.

Системи автоматизованого проєктування (CAD) представляють об'єкти через математично точні параметричні поверхні, найчастіше використовуючи NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) — криві та поверхні, визначені контрольними точками, які забезпечують високу гнучкість дизайну та можливість легко масштабувати й модифікувати форми [44]. NURBS є індустрійним стандартом у будь-якій галузі, що вимагає високоякісної репрезентації поверхонь, включаючи архітектурне проєктування, і використовуються такими програмними пакетами, як Autodesk Alias, Rhino, Siemens NX та CATIA. Ключова характеристика CAD-моделей полягає у тому, що вони зберігають повну інформацію про розміри, допуски, властивості матеріалів та виробничі процеси, пропонуючи високу точність [45]. CAD-моделі оперують у безперервному математичному просторі, де поверхні описуються параметричними рівняннями, що дозволяє досягти абсолютної геометричної точності та ідеально підходить для інженерних розрахунків, виробничих специфікацій та високоякісних маркетингових рендерів. Однак ця точність має свою ціну: CAD-моделі часто характеризуються надзвичайно високою щільністю геометрії, коли NURBS-поверхні конвертуються у тріангульовані меші з мільйонами полігонів.

На противагу цьому, ігрові рушії оперують виключно полігональними мешами, репрезентаціями геометрії, що складаються з вершин, ребер та площин, зазвичай трикутників або чотирикутників [46]. Полігональні меші представляють лише поверхневу геометрію об'єкта та не містять параметричних даних про розміри, допуски або виробничі обмеження. Ця спрощеність є стратегічною: ігрові рушії ставлять пріоритетом ефективність та плавність частоти кадрів, оскільки кожен полігон, кожен виклик рендерингу (draw call) та кожен запит до текстури вносять свій внесок у обчислювальне навантаження [47]. Неоптимізована САД-модель, імпортована безпосередньо в ігровий рушій, швидко призведе до критичного падіння продуктивності, роблячи застосунок непридатним для використання. Більшість 3D-рушіїв рендерингу та ігрових рушіїв використовують полігональні меші через їхню сумісність з GPU-рендерингом, а також гнучкість у моделюванні та легкість редагування у 3D-програмному забезпеченні [45].

Концепція «VR-ready» моделей є ключовою для розуміння вимог до контенту віртуальної реальності. Станом на 2025 рік VR-ready модель визначається не лише геометричною точністю, а й комплексом технічних характеристик, що забезпечують плавну інтерактивну взаємодію. VR-READY — плагін для Autodesk Revit, що з'єднує BIM-моделі з Unity у реальному часі, експортує моделі з кольоровими матеріалами, метаданими та параметрами для створення VR-середовищ [48]. Ключові функції VR-READY включають оптимізацію 3D-геометрії та BIM-параметрів з опціями збереження налаштувань для покращення ефективності в майбутніх проєктах, а PRO-версія забезпечує повне створення VR-проєктів з автоматичним присвоєнням матеріалів через ШІ-функцію, реалістичним освітленням, тінями та контекстним середовищем. Практичні вимоги до VR-ready моделей включають суворі обмеження на кількість полігонів: для мобільних пристроїв рекомендується не перевищувати 500 000 полігонів

[49], тоді як для десктопних VR-систем верхня межа може бути значно вищою, але все одно вимагає ретельної оптимізації.

Процес конвертації CAD-моделей в ігрові рушії представляє собою складний багатоетапний workflow, що вимагає балансування між візуальною точністю та обчислювальною ефективністю. Перехід з безперервного домену CAD до дискретного домену 3D-моделей представляє компроміс між вартістю обробки та візуальною точністю для отримання найкращого користувацького досвіду [50]. Стандартний workflow включає кілька критичних етапів: тесселяцію (перетворення NURBS-поверхонь у трикутні меші), оптимізацію геометрії через ретопологію, видалення внутрішньої геометрії, що ніколи не буде видима користувачу, стратегічне видалення ребер на плоских поверхнях або ділянках з мінімальною кривизною, та зварювання вершин для очищення дрібних розривів [47]. Особливу увагу слід приділити топології меша: необхідно забезпечити оптимальний потік ребер навколо ділянок з високою кривизною, уникати створення n-gons (граней з більш ніж чотирма сторонами) або надмірно розтягнутих трикутників, які можуть спричинити проблеми з шейдингом [51].

Технологія рівнів деталізації (Levels of Detail, LOD) є фундаментальною для забезпечення продуктивності VR-систем при збереженні візуальної якості. LOD-система створює множинні версії одного об'єкта з різною щільністю полігонів: LOD0 — основна, повністю оптимізований меш, що використовується, коли об'єкт знаходиться близько до камери, все ще значно оптимізована порівняно з оригінальною CAD-моделлю; LOD1 — використовується для середніх відстаней з приблизно 30-50% меншою кількістю полігонів, ніж LOD0; LOD2 — для об'єктів на відстані з кількістю полігонів на 70-80% нижчою, ніж LOD0; LOD3 — на дуже великих відстанях модель може бути простим проксі-мешем, білбордом або взагалі вилучена з рендерингу [47]. Точна

кількість рівнів та полігональний бюджет для кожного LOD залежать від цільової платформи, типу застосунку та цілей візуальної якості.

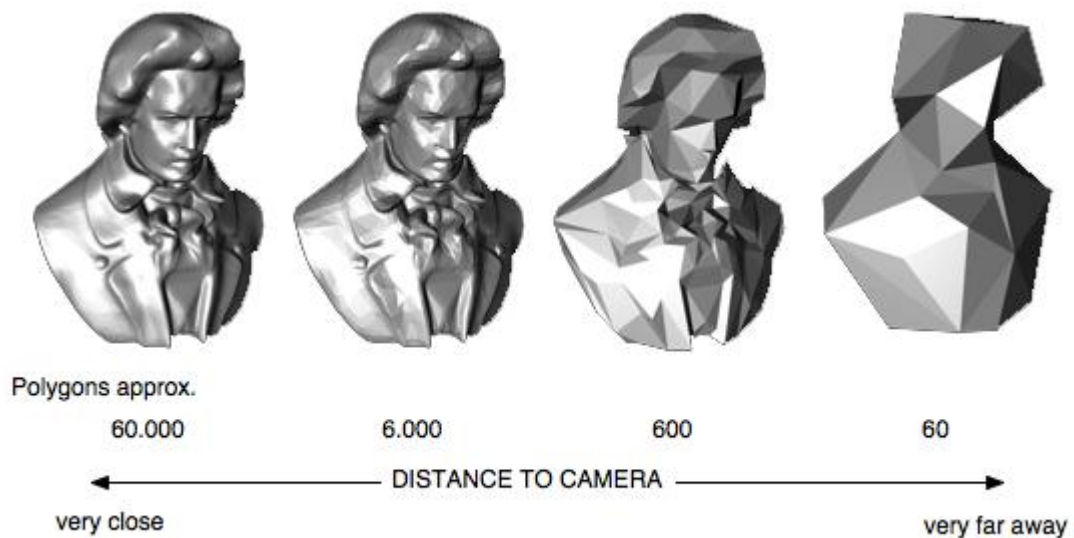


Рис. 1.2.1.1 Принцип відображення системи LOD

Конфлікт між архітектурною точністю та продуктивністю VR-систем є центральною проблемою у застосуванні віртуальної реальності в архітектурній практиці. VR-досвіди вимагають високої продуктивності для підтримки плавних, імерсивних взаємодій, що передбачає оптимізацію 3D-моделей для зменшення кількості полігонів та забезпечення ефективного рендерингу без компромісу візуальної якості [52]. Для забезпечення плавної роботи VR-системи повинні підтримувати мінімум 90 кадрів на секунду (fps), щоб уникнути кібернетичної хвороби та забезпечити комфортний досвід користувача. Це означає, що система має лише 11 мілісекунд на рендеринг кожного кадру для кожного ока (оскільки VR-гарнітури використовують стереоскопічний рендеринг), що є надзвичайно суворим обмеженням. Архітектурні моделі, створені у CAD-системах з метою інженерної точності, часто містять рівень деталізації, що на порядки перевищує те, що може бути ефективно відрендерено в реальному часі.

Критики зазначають, що візуалізація у віртуальній реальності іноді має труднощі з точним відтворенням реальних текстур, матеріалів та освітлення, що призводить до потенційних розбіжностей між цифровою моделлю та завершеною конструкцією [53]. Балансування візуальної деталізації з продуктивністю системи є основною частиною 3D-моделювання для VR: занадто багато полігонів призводить до повільної продуктивності, занадто мало — до блочного або нерозпізнаваного вигляду об'єктів [54]. Правильний підхід залежить від призначення моделі та наскільки близько користувачі взаємодіятимуть з нею: для деталізованих архітектурних елементів, що розглядаються з близької відстані, необхідна вища щільність полігонів, тоді як фонові об'єкти можуть бути значно спрощені.

Сучасні інструменти автоматизації прагнуть полегшити процес конвертації CAD-to-VR. Для Unreal Engine від Epic Games доступні безкоштовні інструменти Datasmith для імпорту CAD-моделей та Twinmotion, тоді як для Unity більш загальним та економічним рішенням є Substance 3D від Adobe або спеціалізовані інструменти Unity Pro з плагінами PiXYZ [55]. PiXYZ Studio є автономним застосунком, що може імпортувати CAD-файли та експортувати бажаний формат файлу меша, пропонуючи тесселяцію за частинами, видалення отворів, децимацію вершин та автоматичне UV-мапування. Незважаючи на ці інструменти автоматизації, ручна оптимізація досвідченими 3D-художниками залишається необхідною для досягнення оптимального балансу між візуальною якістю та продуктивністю.

Технології рендерингу в реальному часі революціонізують архітектурну візуалізацію, усуваючи традиційне вузьке місце тривалого часу обробки. Інструменти як Enscape забезпечують миттєві оновлення CAD-моделей та візуальний зворотний зв'язок в реальному часі, дозволяючи клієнтам носити гарнітуру та інтерактивно досліджувати

проект зі зміною кутів огляду та освітлення на ходу [56]. Станом на 2025 рік очікування щодо інтеграції рендерингу в реальному часі в повсякденні архітектурні процеси зросли майже на 10% порівняно з 2023 роком, хоча інвестиційні плани дещо знизилися, що вказує на розрив між потенціалом технології та готовністю індустрії до її впровадження. Технології трасування променів у реальному часі забезпечують точну симуляцію відбиття світла, м'яких тіней та кольорових відзеркалень, покращуючи реалізм та допомагаючи клієнтам краще візуалізувати завершені середовища [57].

Майбутнє лежить у розробці більш розумних систем автоматизації, що можуть зберігати архітектурну точність при одночасному забезпеченні необхідної продуктивності для імерсивного досвіду віртуальної реальності.

1.2.2 Алгоритми полігонального моделювання

Алгоритми полігонального моделювання зазвичай організовані як послідовність операцій над цими елементами із застосуванням інструментів редагування сітки: створення базових примітивів (куб, сфера), розширення геометрії через екструзію, розріз і злиття вершин, додавання ребер для деталізації, а також управління потоками граней для досягнення бажаної форми об'єкту [58]. Робота зі сіткою включає контролювання зв'язності між вершинами та ребрами, щоб уникати отворів та перенасичення полігонами, що може ускладнити подальшу оптимізацію.

Топологія сітки — це спосіб організації її елементів у просторі. Основні типи граней: трикутники (tris) і чотирикутники (quads). У сучасних графічних рушіях всі полігони зрештою розкладаються на трикутники для рендерингу, оскільки апаратне забезпечення GPU оптимізоване саме під трикутну геометрію. Проте робота з quads має

важливі переваги на етапі створення моделі: чотирикутні грані спрощують управління edge loops, дозволяють легше додавати рівні деталізації (subdivision) і забезпечують більш передбачувану поведінку при деформаціях або анімації. Для об'єктів, що використовуються в VR та реальному часі, це означає більш ефективний та гнучкий робочий процес, оскільки оптимально побудована топологія з quads може знизити ймовірність артефактів при підготовці LOD, згладжуванні поверхні та сітки для різних умов відображення.

Важливість quads vs tris також проявляється у продуктивності VR: хоча сучасні GPU обробляють трикутники найефективніше, неправильне або нерівномірне триангулювання може призвести до надлишкової кількості примітивів, що підвищує навантаження на рендеринг у реальному часі й знижує частоту кадрів. Чотирикутні сітки, навпаки, дозволяють краще контролювати щільність полігонів і вирівнювати потоки ребер, що особливо критично для великих архітектурних сцен у VR, де ефективність рендерингу прямо впливає на комфорт користувача.

У складних проєктах, таких як архітектурні об'єкти з високою деталізацією, часто спочатку створюються високополігональні моделі, що містять багато дрібних деталей і не оптимізовані для реального часу. Потім застосовується процес ретопології — перетворення високополігональної сітки на більш просту, чисту і оптимізовану для рендерингу структуру з правильним розташуванням quads і ефективними потоками ребер. Retopology-сітки мають низьку кількість полігонів, зберігаючи при цьому основну форму та деталі моделі, що критично для VR-продуктивності [59].

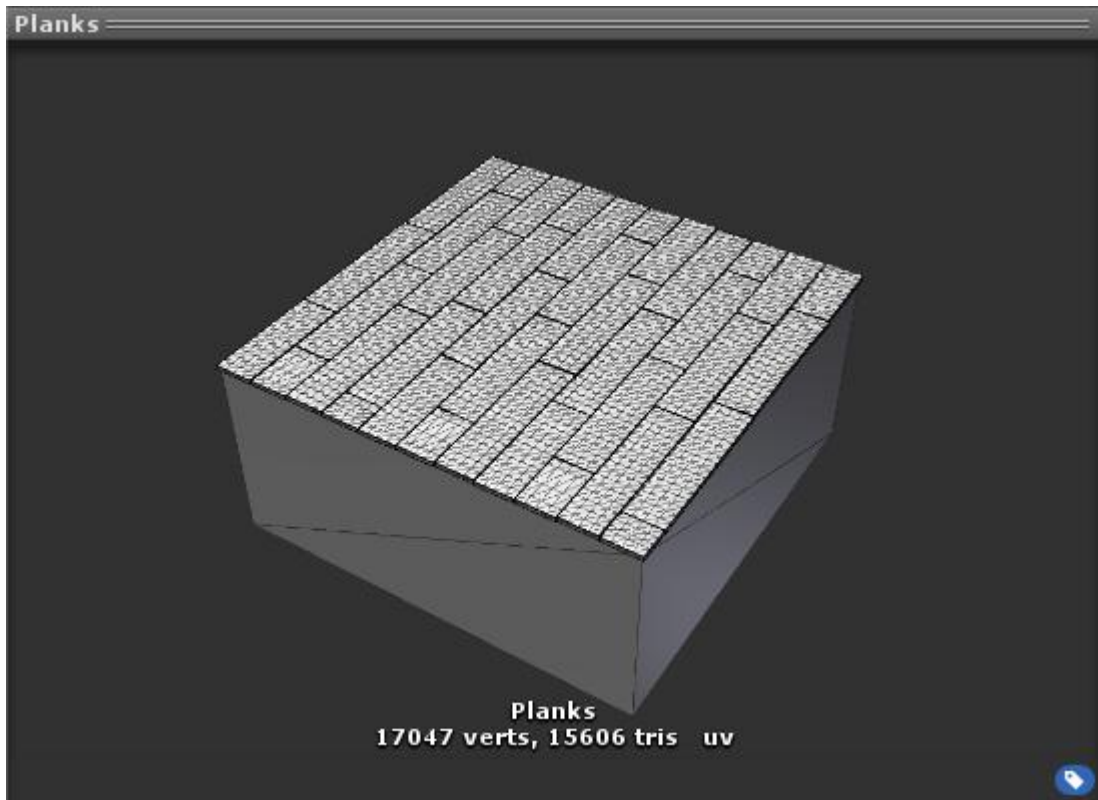


Рис. 1.2.2.1 Приклад неоптимізованої та nereкомендованої сітки для відображення у реальному часі

Дослідження автоматичної реконструкції та оптимізації 3D-сіток для архітектурних моделей активно розвиваються. Наприклад, у сфері автоматичної реконструкції архітектурної спадщини пропонуються системи, що перетворюють фотографії або відео в 3D-mesh із мінімальним ручним втручанням, що є першою стадією побудови базових полігональних моделей для подальшої оптимізації [60]. Хоча конкретні алгоритми автоматичної ретопології архітектурних об'єктів усе ще поступаються за гнучкістю ручним методам, з'являються ШІ-інструменти для автоматизованої ретопології, які зберігають важливі геометричні та топологічні властивості, в тому числі симетрію та UV-координати, прискорюючи створення виробничо-придатних сіток [61].

1.2.3 Класифікація алгоритмів візуалізації: Растеризація та Трасування

У комп'ютерній графіці класична растеризація (Rasterization) і трасування променів (Ray-Tracing) представляють два принципово різні підходи до формування зображення з тривимірної сцени. Растеризація традиційно була основним методом рендерингу в реальному часі, включно в іграх та VR-додатках, тоді як трасування променів історично застосовувалося для створення фотореалістичних статичних зображень у офлайн-рендері. Технічно, растеризація трансформує полігональні примітиви (найчастіше трикутники) у двовимірні пікселі на екрані через низку швидких математичних операцій (проекції, відсікання, біклоподібне затінення), використовуючи апаратні блоки GPU, оптимізовані саме під цей процес. Ray-tracing, натомість, відстежує шлях світлових променів — тобто симулює світло, яке виходить із джерела або камери, відбивається, заломлюється та взаємодіє із об'єктами сцени, створюючи більш реалістичні тіні, віддзеркалення та глобальне освітлення. Цей метод забезпечує вищу візуальну достовірність завдяки точному обчисленню світлових взаємодій, але значно дорожчий з точки зору обчислювальних ресурсів [62].

Однією з ключових причин, чому растеризація залишається стандартом для VR, є суворе вимога до високої частоти кадрів, мінімум 90+ FPS, для збереження комфорту та уникнення симптомів нудоти у користувачів VR-гарнітур. VR-середовища рендеряться для кожного ока окремо зі значними роздільними здатностями, а будь-які падіння частоти кадрів призводять до розладу візуального сприйняття та зниження ефекту присутності. Натомість трасування променів, навіть із апаратним прискоренням, залишається набагато повільнішим: включення повного ray tracing у іграх часто знижує частоту кадрів на 30–65 % у порівнянні з чистою растеризацією, що робить його складним варіантом для VR без

значних оптимізацій або гібридних підходів (растеризація як базовий шар + вибіркового ray tracing для ефектів) [63].

Апаратне прискорення трасування променів у 2025–2026 роках уже стало звичним явищем у десктопних GPU, таких як серії NVIDIA GeForce RTX (Turing, Ampere і пізніші), які мають RT-ядра спеціально для обробки операцій ray tracing у реальному часі. За рахунок цих апаратних блоків можливо досягти значного прискорення обчислень RT-ефектів порівняно з повністю програмними реалізаціями, але навіть вони не гарантують стабільно високі FPS для VR без компромісів у якості або застосування додаткових технологій на кшталт DLSS (суперсемплінг на базі ШІ, що зменшує навантаження). Важливо зазначити, що самі VR-гарнітури, особливо автономні, поки що не мають потужних RT-ядер у своїх інтегрованих чіпсетах; можливі апаратні оптимізації є досить обмеженими через теплові та енергетичні обмеження мобільних SoC, хоча дискусії у спільнотах показують, що деякі процесори (наприклад, Snapdragon-серії) теоретично підтримують апаратне прискорення трасування світла у певному обсязі, хоч і не на рівні настільних RTX-GPU. В цілому, апаратне прискорення ray tracing у VR-системах сьогодні здебільшого реалізується через гібридні системи, де потужні GPU, підключені до гарнітур, беруть на себе складні обчислення RT-ефектів, але базовий рендеринг залишається растеризаційним для підтримки необхідних частот кадрів [64].

Через ці технічні обмеження растеризація продовжує домінувати як стандартний метод візуалізації в VR, забезпечуючи високу продуктивність і низьку затримку. Трасування променів, хоча й пропонує кращу графічну достовірність, залишається більш ресурсомістким і тому застосовується вибірково або як частина гібридних рендеринг-технік, що дозволяють зберігати продуктивність без значної втрати візуальної якості [62].

1.3 Огляд існуючих програмних рішень та світового досвіду віртуальної реконструкції об'єктів

1.3.1 Соціальний та освітній аспект. Віртуальні музеї

Віртуальна реальність радикально трансформує парадигму доступу до культурної спадщини, перетворюючи її з привілею географічно та фізично привілейованих груп на універсальне право, доступне незалежно від місцезнаходження, фінансових можливостей чи фізичних обмежень. Ця технологія долає традиційні бар'єри доступності, від географічної віддаленості та вартості подорожей до архітектурних перешкод та сенсорних обмежень, створюючи нову реальність, де культурна спадщина стає загальнодоступною. Віртуальні тури, VR-музеї та адаптивні технології не лише розширюють аудиторію культурних інституцій, а й пропонують альтернативні способи взаємодії з артефактами та архітектурою, які часто перевершують можливості фізичних відвідувань. Особливо актуальним це стає у контексті глобальних криз — від пандемії COVID-19 до збройних конфліктів, що загрожують культурній спадщині.

Найбільш резонансним проектом 2024-2025 років стала віртуальна реконструкція собору Нотр-Дам де Парі, яка набула множинних форм та ітерацій. Проект «Eternal Notre-Dame», розроблений компанією Orange у співпраці з Діоцезом Парижа та публічною установою зі збереження собору, представляє 42-хвилинний імерсивний VR-досвід, що дозволяє відвідувачам досліджувати собор через століття, від середньовічного будівництва до сучасності [65]. Досвід був доступний у підземному просторі на площі перед собором і працював до вересня 2025 року, а також гастролював у Шанхаї (липень 2024 - лютий 2025) та інших містах світу. Проект був створений з близькою співпрацею ради експертів, призначених партнерами, щоб забезпечити архітектурну, історичну та художню достовірність досвіду, а також відповідність духовному призначенню собору. Відвідувачі могли віртуально відвідати недоступні місця,

спостерігати процес будівництва та дізнатися про історичні події, що відбувалися у стінах собору [66]. 30% від вартості квитка передавалося публічній установі для фінансування реконструкційних робіт та Фонду Нотр-Дам, роблячи кожного відвідувача донором відбудови.

Паралельно французький стартап Histoverу розробив доповнену реальність для подорожуючої виставки «Notre-Dame de Paris, the Experience», яка використовує інтерактивні планшети HistoPad для дослідження 3D історичних реконструкцій з усіх кутів, маніпулювання віртуальними об'єктами та подорожі у часі через різні епохи [67]. Проєкт залучив 12 художників та координував роботу з семи наукових комітетів залежно від історичного періоду, забезпечуючи безпрецедентну точність візуалізації. У грудні 2024 року, з нагоди відкриття відреставрованого собору, Ars Electronica Futurelab разом з французькими стартапами Iconem та Histoverу створили імерсивний досвід «Notre-Dame Immersive» у Deep Space 8K, який дозволяє відвідувачам досліджувати величезну модель собору у стереоскопічному 3D з вражаючою архітектурою та деталями вітражів [68]. У листопаді 2024 року адаптована версія цього досвіду дебютувала у Музеї витончених мистецтв у Х'юстоні, США, демонструючи глобальний резонанс проєкту.

В Україні, де станом на кінець 2025 року ЮНЕСКО верифікувала пошкодження 515 об'єктів культурного значення з початку повномасштабного вторгнення Росії [69], віртуальна документація набула екзистенційного значення. Серед пошкоджених об'єктів — 153 релігійні споруди, 268 будівель історичного та художнього значення, 38 музеїв та 33 пам'ятники. Міністр культури та стратегічних комунікацій України повідомив про майже 1200 зруйнованих об'єктів, включаючи 117 національного значення, та понад 2000 пошкоджених культурних інституцій, з яких 368 повністю знищені [70]. У червні 2025 року російський дронний удар пошкодив Софійський собор в Києві — об'єкт

Всесвітньої спадщини ЮНЕСКО XI століття, карниз головної апсиди якого зазнав серйозних ушкоджень.. Цей акт порушує Гаазьку конвенцію 1954 року про захист культурних цінностей під час збройних конфліктів, стороною якої є Російська Федерація.

У відповідь на цю кризу була створена низка ініціатив цифрового збереження. У лютому 2025 року перша міжнародна міністерська конференція з питань культури в Ужгороді, скликана Міністерством культури України за підтримки 28 країн-партнерів, Європейської Комісії та ЮНЕСКО, призвела до прийняття Декларації про зміцнення стійкості культурного сектору в Україні та домовленості про створення Українського фонду культурної спадщини [71]. Понад 540 000 музейних предметів було евакуйовано до безпечніших зон, проте більше 3 мільйони об'єктів спадщини залишаються під загрозою, багато з них розташовані в зонах конфлікту або поблизу них. Загальна оцінка збитків культурному сектору України перевищує €27 мільярдів.

Інклюзивність для людей з обмеженими можливостями стала центральним фокусом сучасних VR-проектів у культурній сфері. У липні 2024 року було опубліковано дослідження з розробки та валідації VR-сценаріїв для підвищення обізнаності про інвалідність серед працівників музеїв, яке продемонструвало, що віртуальна реальність може бути ефективним інструментом для висвітлення фізичних бар'єрів доступності та соціальних взаємодій [72]. П'ять осіб з інвалідністю та сім працівників музеїв випробували два VR-сценарії, що ілюструють візит до музею для особи з поганим зором або на інвалідному візку, включаючи різні сцени, такі як пошук доступного входу та взаємодія з віртуальними співробітниками. Учасники високо оцінили корисність сценаріїв у описі соціальних та фізичних бар'єрів, що їх відчувають люди з інвалідністю.

У лютому 2025 року було представлено проєкт покращення доступності Музею кераміки в Кутрофіано (Італія) через комбінацію

віртуальної реальності, аудіо- та відеоконтенту, тактильних відбитків, NFC-міток та QR-кодів, створену у співдизайні з представниками цільових груп користувачів [73]. Стратегічне застосування передових технологій було спрямоване на розширення музейного досвіду для різноманітних відвідувачів та сприяння інклюзивності. У жовтні 2025 року була опублікована методологія проєктування доступних музейних досвідів у віртуальній реальності для осіб з розладами аутистичного спектру (РАС), що базується на трьох ключових принципах дизайну: модульність, передбачуваність та увага [74]. Дослідження користувачів, що порівнювало VR-досвід на основі цих принципів з традиційним музейним відвідуванням, продемонструвало значні переваги з точки зору музейного досвіду, з варіаціями залежно від рівня РАС. Методологія була застосована до «Залу Сезонів» у Палаццо Кариньяно в Турині, Італія, створюючи VR-застосунок з віртуальним музейним досвідом, натхненним реальним відвідуванням.

Китайські музеї також стали піонерами інклюзивних практик. У 2025 році ЮНЕСКО опублікувало збірку кейсів універсальної доступності музеїв Китаю, де Музей Сичуанського університету запровадив «п'ятивимірний підхід до доступності», що включає інновації у виставках з тактильними 3D-репліками, мультисенсорними зонами та VR/AR-досвідами для забезпечення доступності колекцій для всіх відвідувачів [75]. Музей воїнів теракоти розробив «VR-тур воїнами теракоти» з використанням гігапіксельної технології візуалізації, що дозволяє користувачам детально розглядати артефакти через комп'ютери, смартфони або VR-гарнітури з повною імерсією, підтримкою багатьох мов, субтитрами та функціями доступності для користувачів з порушеннями слуху. Також була розроблена цифрова платформа жестової мови «Скануй-та-дивись» у співпраці з Пекінською федерацією осіб з

інвалідністю, що перетворює аудіонарацію на двоканальні відео з жестовою мовою та субтитрами.

1.3.2 Український досвід віртуальної реконструкції

Віртуальна реконструкція архітектурної спадщини в Україні останніми роками стала важливою частиною культурної пам'яті та технологічної адаптації до нових викликів, особливо в контексті повномасштабної війни. Українські проекти охоплюють як доповнену (AR), так і віртуальну реальність (VR), спрямовані на цифрове збереження, популяризацію та документування об'єктів, що зазнали руйнувань або перебувають під загрозою втрати.

Одним із явних прикладів є ініціативи команди Skeiron, яка понад вісім років займається оцифруванням української спадщини. У межах їхнього проекту «Кишенькова країна» (Pocket Country) фахівці провели масштабну експедицію з 3D-сканування 40 пам'яток архітектури в усіх 24 областях України і Автономній Республіці Крим, використовуючи фотограмметрію та програмні рішення для створення точних цифрових моделей. На основі оцифрованих даних було розроблено серію AR-листівок та мобільний додаток Pocket City AR для платформ iOS і Android, що дозволяє переглядати моделі пам'яток у доповненій реальності та включає аудіогіди українською й англійською мовами, сприяючи популяризації національної спадщини серед широкої аудиторії [76].



Рис. 1.3.2.1 3D-скан Музею Мистецтв Прикарпаття. Skeiron [77]

Цей проєкт, започаткований із Pocket City – Lviv, демонструє, як цифрові технології можуть зберігати архітектурну пам'ять міст, від Львова до Харкова та Одеси, та створювати доступні інтерактивні формати для освітніх, туристичних і наукових цілей [78]. Крім того, Skeiron долучилась до виставки «Україна в мініатюрі», де 3D-моделі знищених війною об'єктів (наприклад Донецького драмтеатру у Маріуполі чи інших пам'яток) були представлені у Трапезній палаті Національного заповідника «Києво-Печерська лавра», поєднуючи VR-тури, імерсивні відео та музичний супровід для глибшого переживання контексту пам'яток [79].

Паралельно працюють й інші українські організації. ГО «Пікселейтід Реалітіз» (Pixelated Realities) активно просуває цифровізацію культурної спадщини через 3D-сканування та VR, зокрема в межах проєкту Museum of Ukrainian Victory, де об'єкти з Одещини, Херсонщини, Харківщини та інших регіонів були оцифровані для збереження та поширення у відкритих

цифрових архівах і навіть опубліковані на платформі Europeana.eu для доступу на європейському рівні [80]. Організація також співпрацює з воєнними кореспондентами, залучаючи їх до процесу фотограмметрії у важкодоступних зонах, що робить документування зруйнованих об'єктів ідентичним архівним процесам [81].

Окремі VR-ініціативи створюють віртуальні музеї війни, що представляють реалістичні 3D-тури по містах та районах, які постраждали від бойових дій. Такі проєкти, як VR-музей пам'яті війни (War up Close), доступні у форматі 360° панорам і дозволяють у VR-окулярах пережити атмосферу Києва, Ірпеня, Бучі, Харкова та інших локацій, зберігаючи документальні зображення руйнувань для майбутніх поколінь [82].

Хоча конкретно про проєкт «Київська фортеця у VR» на момент пошуку чітких джерел, що описують саме VR-реконструкцію цієї пам'ятки, не вдалося знайти, існують згадки про цифрові музейні колекції Київської фортеці у науковому аналізі українського досвіду VR-реконструкції, що свідчить про зацікавленість українських дослідників у впровадженні VR-технологій для відтворення навіть найбільш комплексних історичних об'єктів [83].

РОЗДІЛ II. ПЕРЕДПРОЄКТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Дослідження інструментарію та вибір програмного забезпечення для реалізації VR-сцени

Вибір технологічного стеку для створення архітектурної візуалізації у віртуальній реальності є критичним стратегічним рішенням, що визначає не лише якість кінцевого продукту, а й ефективність робочого процесу, швидкість ітерацій та можливості масштабування проєкту. У 2025 році індустрія архітектурної візуалізації перебуває на перехресті двох парадигм: традиційного статичного рендерингу, представленого зв'язкою 3ds Max + V-Ray/Corona, та сучасного real-time рендерингу в ігрових рушіях. Вибраний для даного проєкту стек: Blender (моделювання), Marmoset Toolbag (запікання карт), Substance Painter (текстурування) та Unreal Engine 5 (фінальна збірка та інтерактивність) представляє оптимальний баланс між вартістю, гнучкістю, продуктивністю та підтримкою сучасних стандартів, зокрема Physically Based Rendering (PBR) та сумісністю з автономними VR-гарнітурами Pico 4 Ultra та Meta Quest 3.

Порівняння з альтернативним стеком 3ds Max + V-Ray виявляє кілька ключових відмінностей. 3ds Max залишається золотим стандартом в індустрії архітектурної візуалізації, використовуваним провідними студіями як Gensler та Foster + Partners [84], та пропонує інтеграцію з екосистемою Autodesk, просунуті інструменти моделювання (RailClone, Forest Pack) та безпроблемну сумісність з V-Ray або Corona Renderer для фотореалістичних статичних рендерів [85]. Однак цей стек має критичні обмеження для VR-розробки. По-перше, вартість: підписка на 3ds Max становить близько \$1,700/рік [86], що для невеликих студій або фрілансерів є значним фінансовим бар'єром. По-друге, V-Ray та Corona — це офлайн-рендери, які не призначені для real-time рендерингу, необхідного для VR. Конвертація сцен з V-Ray у Unreal Engine вимагає

повного ре-текстування під PBR-workflow, втрати часу на адаптацію освітлення та оптимізації геометрії.

Blender, як open-source альтернатива, демонструє вражаючу еволюцію: станом на 2025 рік він має два нативні рендерні движки — Cycles (ray-tracing для фотореалізму) та Eevee (real-time для швидких превью), активну спільноту з тисячами безкоштовних аддонів (Hard Ops, BoxCutter, DecalMachine) та повну підтримку PBR-workflow з node-based shading [87]. Критично важливо, що Blender безкоштовний, що дозволяє розподілити бюджет на інші аспекти проєкту. Водночас Blender має обмеження: крива навчання є крутішою через hotkey-heavy інтерфейс, і він може мати проблеми з обробкою надзвичайно великих сцен (хоча для середньомасштабних архітектурних об'єктів це не критично) [88].

Критерій швидкості ітерацій є вирішальним для VR-проєктів, де необхідно постійно тестувати сцени безпосередньо в гарнітурі. У цьому Unreal Engine 5 з його real-time рендерингом радикально перевершує класичний workflow 3ds Max + V-Ray: замість очікування годин для фінального рендеру зображення, розробник може миттєво внести зміни та протестувати їх у VR [89]. Таким чином, час ітерації скорочується з днів до хвилин. Інструменти як Enscape забезпечують миттєві оновлення CAD-моделей у реальному часі, проте Unreal Engine надає більш глибокий контроль над візуальною якістю, матеріалами та інтерактивністю.

Підтримка сучасних стандартів PBR є абсолютною необхідністю для VR, оскільки матеріали повинні правильно реагувати на освітлення в усіх кутах огляду та умовах, незалежно від позиції камери. Вибраний стек повністю підтримує PBR: Blender має node-based Principled BSDF shader, Substance Painter є індустрійним стандартом для PBR-текстування з metal/roughness workflow, а Unreal Engine 5 нативно оперує PBR-матеріалами з параметрами Base Color, Roughness, Metallic, Normal [90]. Усі три програми використовують однакову логіку матеріалів, що

забезпечує консистентність візуального результату на всіх етапах пайплайну без необхідності конвертації між різними системами шейдингу.

Сумісність із VR-гарнітурами Pico 4 Ultra та Quest 3 є ключовою технічною вимогою. Обидві гарнітури базуються на чіпсеті Qualcomm Snapdragon XR2 Gen, де Pico 4 Ultra має 12GB RAM, а Quest 3 — 8GB RAM. Це мобільні процесори з обмеженою обчислювальною потужністю порівняно з десктопними GPU. Unreal Engine 5 офіційно підтримує Meta Quest з версії 5.1, використовуючи OpenXR стандарт [91], що забезпечує кросплатформеність між різними гарнітурами. Критично важливо, що для автономних VR-гарнітур необхідно використовувати Forward Shading замість Deferred Rendering, MSAA для антиаліасингу, та вимикати функції Nanite та Lumen, оскільки вони не підтримуються на мобільних чіпсетах Android.

Вибраний стек Blender-Marmoset-Substance-UE5 оптимізований для VR-розробки з урахуванням специфіки мобільних чіпсетів: Blender забезпечує безкоштовне моделювання з PBR-підтримкою, Marmoset Toolbag пропонує найшвидше GPU-прискорене запікання карт нормалей з ray-tracing, Substance Painter створює PBR-текстури з повним контролем над усіма каналами, а Unreal Engine 5 надає фінальну платформу для збірки, оптимізації та запуску на автономних VR-гарнітурах. Цей стек забезпечує баланс між якістю, вартістю та продуктивністю, необхідний для професійної архітектурної візуалізації у віртуальній реальності.

2.2 Особливості моделювання сучасних архітектурних форм на прикладі терміналу аеропорту.

2.2.1 Опис терміналу аеропорту. Підготовчі роботи

Long Beach Airport (ICAO: KLGB), також відомий як Daugherty Field, є функціональним громадським аеропортом у південній Каліфорнії, що вирізняється компактною термінальною комплексністю та історичною

архітектурною спадщиною свого головного терміналу, спроектованого у 1941 році архітекторами William Horace Austin та Kenneth Smith Wing у стилі, що поєднує елементи Streamline Moderne та геометричної абстракції, характерної для раннього міжнародного стилю XX століття. Цей історичний будинок, який нині визнано місцевою культурною пам'яткою, відзначається чіткими горизонтальними лініями, плавними фасадами, мінімальним декоративним оздобленням, великими вікнами та художніми мозаїками на підлозі, виконаними Grace Clements у рамках проекту Works Progress Administration, що візуально підкреслюють авіаційні та навігаційні мотиви (біля 1.6 млн плиток) [92]. Хоча нинішній активний термінал, використаний як основа для моделі XWind Studios, не є тим самим історичним об'єктом, він виник упродовж фаз Terminal Area Improvement Program із новим лобі для посадки й системою огляду багажу, що демонструє прагнення до поєднання історичного контексту з сучасними функціональними вимогами аеропортової інфраструктури.

Проєкт реконструкції цифрової моделі терміналу KLGB під керівництвом Ablai McKerrow з XWind Studios спрямований на створення максимально точної симуляційної репрезентації аеропорту для середовища Microsoft Flight Simulator 2020/2024. Розробка перебуває на етапі завершення, з орієнтовним релізом протягом першого кварталу 2026 року, і передбачає тривалу роботу з аналізу архітектурних особливостей та технічних деталей становлення об'єкта. У рамках підготовчого етапу було виконано збір та інтеграцію базових геометричних даних за допомогою Google Earth, що забезпечило вихідні ортофотознімки й загальні пропорції будівель, які були використані для побудови початкової тривимірної сітки моделі. Далі було використано плагін BLOSM для екстракції високоточних контурів дахів, розмірів та орієнтації об'єктів, що стало фундаментом для коректної масштабної побудови всього термінального комплексу.



Рис. 2.2.1.1 3D модель терміналу доступна у Google Earth та використана як референс для масштабу

Паралельно здійснювався аналіз наземних фотографій, відеозаписів з YouTube та панорам Google Maps, що дозволило відтворити характерні фасадні елементи, фактури матеріалів та деталі інтер'єрних зразків. Візуальні джерела були критично важливими для ідентифікації віконних модулів, деталей покриття й елементів зовнішнього оздоблення, особливо в зонах громадського використання, де офіційних креслень було недостатньо. Такий комплексний підхід до збору даних гарантував, що пропорції об'єктів та архітектурні взаємовідношення в моделі відповідають реальним параметрам, що є ключовим для симуляцій високого рівня. Було також налагоджено роботу з текстуруванням, що включало створення фізично коректних матеріалів і розробку карти відображення поверхонь для досягнення візуального реалізму під різними кутами освітлення. Це особливо важливо для кінцевого продукту, оскільки правильна передача світлотіні та матеріальних відгуків підсилює іммерсивність симуляції.

2.2.2 Моделювання та текстурування терміналу

Моделювання терміналу аеропорту в середовищі Blender здійснювалося з урахуванням специфіки використання об'єкта в симуляторах високого рівня, зокрема Microsoft Flight Simulator, де архітектурні елементи сприймаються як з великої відстані, так і в безпосередній близькості під час керування або стоянки повітряних суден. Основним принципом побудови геометрії стала модульна архітектура, яка дозволяє поєднати високу деталізацію з контрольованою складністю сцени та забезпечує гнучкість при подальшому доопрацюванні й оптимізації.

Процес моделювання було розпочато з формування базових конструктивних модулів, що відповідають повторюваним елементам терміналу: секціям фасаду, віконним блокам, колонам, перекриттям, фрагментам покрівлі та внутрішнім просторовим осям. Кожен модуль створювався як окремий об'єкт з уніфікованими розмірами та точками прив'язки, що дозволяло швидко масштабувати структуру будівлі без порушення загальних пропорцій. Такий підхід особливо важливий для великих громадських просторів, де архітектура базується на ритмічному повторенні конструктивних елементів. Повне моделювання інтер'єрів інтегрувалося в цю систему шляхом створення внутрішніх модулів, які логічно відповідали зовнішнім оболонкам, зберігаючи коректну товщину стін, глибину ніш та взаємне розташування приміщень.

Одним із найбільш технічно складних аспектів стало відтворення зашкленних фасадів та відкритих просторів терміналу. Великі площини скла потребують поєднання точної геометрії з фізично коректною поведінкою матеріалів, оскільки вони одночасно відбивають навколишнє середовище, пропускають світло та забезпечують візуальний зв'язок між екстер'єром і інтер'єром. У Blender це вимагало чіткого розділення фасадів на конструктивні шари: несучі рами, скляні панелі, внутрішні перегородки та допоміжні елементи. Відкриті простори, характерні для сучасного

терміналу, ускладнювали задачу через необхідність підтримувати візуальну глибину сцени без надмірного збільшення кількості полігонів. Для цього використовувалося поєднання реальної геометрії для ключових об'єктів першого плану та спрощених, але пропорційно точних форм для віддалених або другорядних елементів.

Топологія моделі формувалася за алгоритмічним принципом, що поєднує ієрархічну структуру сцени з логічною сегментацією геометрії. Будівля поділялася на функціональні блоки (екстер'єр, інтер'єр, покрівля, технічні зони), кожен з яких мав власну сіткову структуру та рівень деталізації. Сітка створювалася переважно з чотирикутників із рівномірним розподілом полігонів, що полегшує подальше редагування, коректну роботу нормалей та стабільний експорт у формат, сумісний із рушієм MSFS. Деталізація концентрувалася в зонах, де пілот або камера перебувають на мінімальній дистанції, тоді як у менш доступних ділянках застосовувалася оптимізована геометрія з мінімально необхідною кількістю вершин.

Важливою частиною алгоритму стала підготовка моделі до експорту, що передбачала чітке іменування об'єктів, логічну організацію колекцій та уніфіковану орієнтацію нормалей. Така структура дозволяє зберегти контроль над складною сценою, спрощує подальшу інтеграцію в симуляційний пайплайн і мінімізує ризики помилок при компіляції.



Рис. 2.2.2.1 Зображення екстер'єру терміналу

Текстурування терміналу аеропорту Long Beach (KLGB) виконувалося відповідно до стандарту Physically Based Rendering (PBR), який є де-факто основою для сучасних симуляційних рушіїв і забезпечує передбачувану та фізично коректну взаємодію матеріалів зі світлом. Основним інструментом у робочому процесі виступав Substance Painter, що дозволив організувати текстурування складної архітектурної сцени з великою кількістю матеріалів, зберігаючи єдність візуальної мови та контроль над технічною якістю.

Робочий процес починався з підготовки коректних UV-розгорток, орієнтованих на мінімізацію спотворень і оптимальне використання текстурного простору. Далі у Substance Painter формувалися базові матеріали, ключовими з яких стали бетон, метал та пластик — домінуючі поверхні сучасного терміналу. Бетонні матеріали створювалися з урахуванням неоднорідності реальних поверхонь: використовувалися багат шарові маски для варіації тону, мікрорельєфу та ступеня зношення, що дозволяло уникнути візуальної монотонності великих площин. Металеві елементи, зокрема каркаси фасадів і інтер'єрні конструкції, налаштовувалися з точним балансом між значеннями roughness і metallic, що забезпечувало коректні відблиски під різними кутами освітлення.

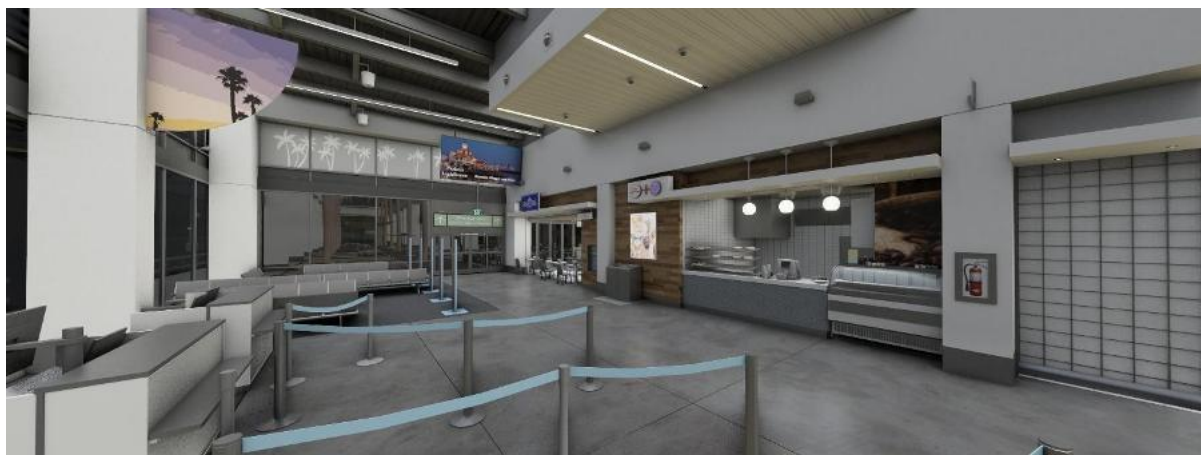


Рис. 2.2.2.2 Зображення інтер'єру терміналу

Специфіка створення текстур для Microsoft Flight Simulator полягала у необхідності використання текстур високої роздільної здатності, особливо для інтер'єрів, де пілот може перебувати на малій відстані від об'єкта. Написи, навігаційні таблички, розмітка підлоги та дрібні архітектурні деталі вимагали ultra-high текстурних сетів (4K), щоб зберегти чіткість без розмиття навіть при максимальному наближенні камери. Це рішення було свідомо обраним, оскільки модель створювалася як комерційний продукт преміального рівня для XWind Studios, де візуальна достовірність є ключовою конкурентною перевагою.

У результаті застосований підхід до PBR-текстурування дозволив досягти високого рівня реалізму, відповідного вимогам комерційного продукту для MSFS, водночас забезпечивши стабільність і передбачуваність візуальної поведінки матеріалів у різних умовах освітлення.



Рис. 2.2.2.3 Зображення загального вигляду терміналу

2.3 Процес експортування з ArchiCad та оптимізація моделі на прикладі Галицького Замку

Архітектурна модель Галицького замку була розроблена студентом Семчук А.С. під науково-педагогічним керівництвом доцента кафедри Савчук А.І. у середовищі ArchiCAD, яке є промисловим стандартом для інформаційного моделювання будівель. В ArchiCAD структура замку відображалася через типізовані архітектурні елементи, такі як стіни, перекриття, віконні та дверні прорізи, дахові конструкції, з використанням параметричних компонентів, що забезпечували високий рівень аналітичної точності й адаптивності до історичних даних.

Архітектурна модель містила великий набір об'єктів, кожен з яких відповідав реальним частинам замку. Проте такі CAD-системи, як ArchiCAD, характерні надлишковою геометричною складністю: елементи створюються як точні NURBS- або твердотільні об'єкти з великою кількістю контрольних точок і параметричних властивостей, що є оптимальними для архітектурних креслень і BIM-аналітики, проте часто надмірними для реального часу чи ігрових рушіїв. Наприклад, стіни та перекриття в ArchiCAD представляються як багатошарові тіла з усіма своїми властивостями, включно зі структурними та теплоізоляційними шарами, тоді як для цілей візуалізації простого відображення достатньо полегшеної сітки. Аналогічно віконні та дверні об'єкти містять параметричні деталі, що суттєво ускладнює геометрію при експорті.

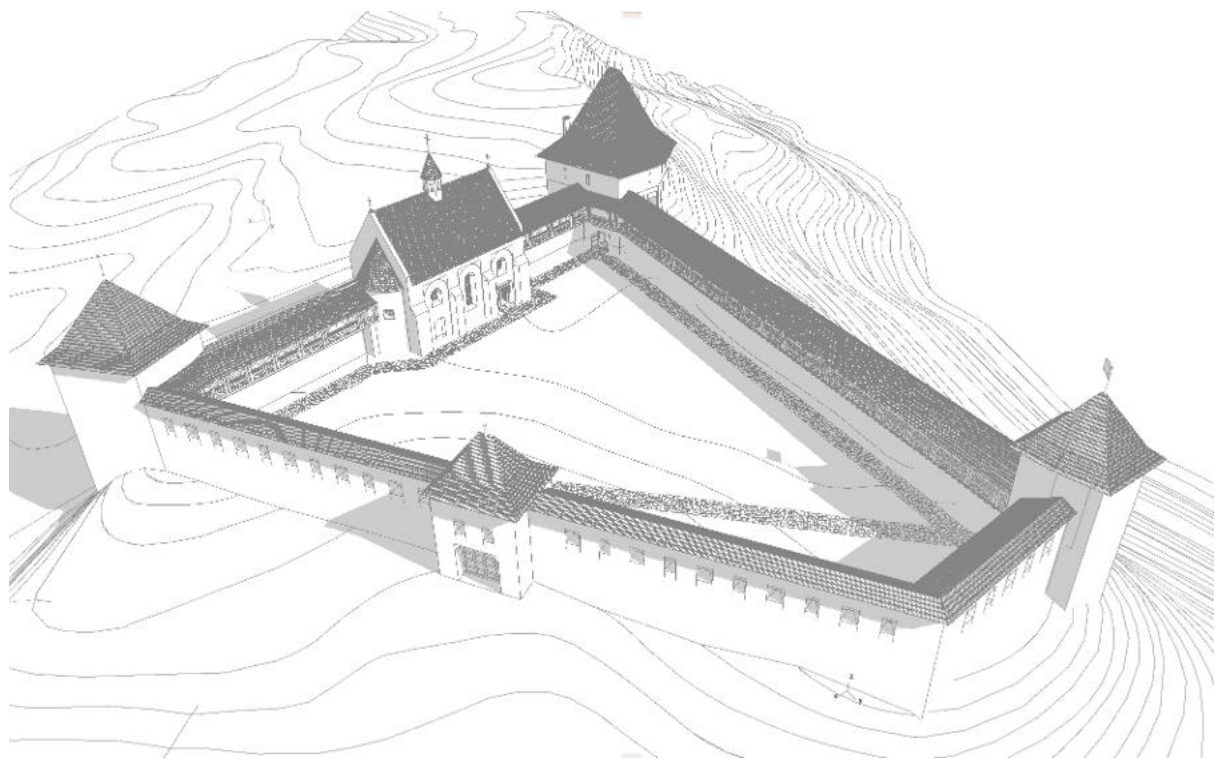


Рис. 2.3.1 Загальний вигляд моделі у ПЗ ArchiCad

Ці технічні виклики визначили вибір формату FBX для передачі геометрії з ArchiCAD у зовнішні 3D-редактори та рушії. Формат FBX є загально підтримуваним форматом для обміну 3D-контентом між CAD/BIM-середовищами та середовищами цифрового контенту, такими як Blender, Unity або Unreal Engine, оскільки він дозволяє зберігати ієрархію об'єктів, трансформації, просторові координати та частину інформації про матеріали під час експорту. Використання FBX також було обґрунтоване потребою зберегти структурну ієрархію замкових компонентів (стіни, перекриття, вікна тощо), що важливо для подальшої деталізації та оптимізації моделі. Також ArchiCAD у своїх новіших версіях підтримує експорт FBX із можливістю матеріалізації об'єктів, включно з опціями “Textures Export to Folder”, що створює файл і окрему папку з пов'язаними текстурами, що спрощує подальше опрацювання у Blender чи іншому середовищі [93].

Проте між представленням геометрії в архітектурному ПЗ і ігрових рушіях існує концептуальна різниця: перше оперує параметричними, високоточними твердісними тіловими об'єктами, призначеними для аналітики і BIM-процесів, тоді як ігрові рушії потребують оптимізованих полігональних сіток із чіткою UV-розгорткою та спрощеною топологією для рендерингу в реальному часі. У CAD-моделях часто використовуються форми, які мають зайві деталі або дублюючі поверхні, що при експорті до Blender можуть створювати зайві полігони чи некоректно інтерпретовані нормалі. Це ускладнює роботу з текстурами та матеріалами під час роботи з ігровим рушієм. Тому правильна підготовка моделей, налаштування опцій експорту та подальше вручну-орієнтоване “очищення” геометрії після FBX-імпорту є невід'ємною частиною пайплайну підготовки віртуальної реконструкції для рендерингу чи інтерактивних застосувань [94].

Етап оптимізації моделі Галицького замку в середовищі Blender став ключовим перехідним процесом між архітектурним представленням об'єкта та його інтеграцією в ігровий рушії Unreal Engine 5 для використання у віртуальній реальності. Основною метою цього етапу було приведення геометрії до стану, придатного для рендерингу в реальному часі, без втрати архітектурної читабельності та історично значущих форм.

Оптимізація розпочиналася з очищення геометрії, отриманої після експорту з CAD-середовища. Через специфіку параметричного моделювання в ArchiCAD модель містила значну кількість надлишкових вершин і полігонів, які не впливали на візуальне сприйняття. У Blender застосовувалися інструменти злиття дублікатів вершин (Merge by Distance), що дозволяло усунути мікроскопічні розбіжності у координатах, які часто виникають при експорті твердотільних об'єктів. Паралельно здійснювалася перевірка орієнтації нормалей, оскільки інвертовані нормалі могли призводити до некоректного освітлення або повного

зникнення поверхонь у рушії. Виправлення нормалей виконувалося як автоматичними методами перерахунку, так і ручною корекцією у складних вузлах.

Децимація геометрії застосовувалася вибірково, з урахуванням функціонального призначення елементів. Архітектурні частини, що не потребували високої деталізації при близькому огляді (наприклад, внутрішні масиви мурів, вторинні перекриття, допоміжні конструкції), оптимізувалися за допомогою модифікатора Decimate із збереженням загального силуету. Водночас ключові елементи, що формують впізнаваний образ замку, залишалися з вищою щільністю сітки, щоб уникнути втрати характерних нерівностей і рельєфу.

Особливу увагу було приділено створенню UV-розгортки для складних поверхонь кам'яних стін замку. Через нерегулярний характер геометрії стандартні автоматичні методи розгортки були недостатні. Алгоритм UV-unwrapping базувався на логічному поділі стін на сегменти відповідно до архітектурної структури: зовнішні та внутрішні поверхні, кути, аркові елементи. Для кожного сегмента визначалися шви (seams) у місцях природних розривів або змін напрямку кладки, що мінімізувало видимі спотворення текстур. Розгортка виконувалася з акцентом на збереження масштабності кам'яної текстури, щоб уникнути візуальних розбіжностей між різними частинами стін. Подальше вирівнювання та пакування UV-островів забезпечувало ефективне використання текстурного простору.

З метою зменшення кількості Draw Calls дрібні елементи архітектури, такі як фрагменти мурів, допоміжні виступи та залишки конструктивних деталей, об'єднувалися у логічні групи та текстурні атласи. Такий підхід дозволяв використовувати один матеріал для кількох об'єктів, що суттєво знижувало навантаження на GPU в реальному часі.

Атласування виконувалося з урахуванням просторової близькості об'єктів і спільності матеріалів, що спрощувало подальше керування сценою в рушії.

Після завершення оптимізації модель імпортувалася в Unreal Engine 5 у форматі FBX із збереженням ієрархії об'єктів та трансформацій. На етапі імпорту перевірялася коректність масштабів, орієнтація осей та відповідність матеріалів. Для забезпечення можливості вільного переміщення користувача територією замку у VR налаштовувалися колізії, переважно у вигляді спрощених примітивів або кастомних collision-mesh для великих архітектурних масивів. Це дозволяло уникнути надмірно складних колізій, які негативно впливають на продуктивність, зберігаючи при цьому коректну фізичну взаємодію з середовищем.

Освітлення сцени налаштовувалося з урахуванням масштабів об'єкта та вимог VR. Основу складало поєднання глобального освітлення та локальних джерел світла для підкреслення архітектурних форм. У підсумку оптимізована модель Галицького замку була адаптована до інтерактивного середовища, зберігаючи баланс між візуальною достовірністю, історичною виразністю та технічною ефективністю.



Рис. 2.3.1 Вигляд моделі у середовищі Unreal Engine 5

2.4 Методи оптимізації 3D об'єктів та текстур для забезпечення високої продуктивності у VR.

2.4.1 Важливість оптимізації 3D середовища та основні принципи

Віртуальна реальність (VR) як середовище для архітектурних презентацій та освітніх реконструкцій вимагає не лише художньої чи історичної точності моделей, але й технічної оптимізації, що забезпечує комфортну та продуктивну взаємодію користувача з цифровим простором. У VR важливо досягати стабільних показників частоти оновлення кадрів та низької затримки, оскільки вони прямо пов'язані із фізичним самопочуттям користувача: низький FPS або висока затримка можуть викликати роздратування, запаморочення чи нудоту через розбіжність між рухами голови й відображенням сцени в гарнітурі. Це пояснюється тим, що мозок отримує суперечливі сигнали від вестибулярної системи та зору, що особливо критично у VR-середовищах, де розпізнавання простору відбувається через стереоскопічне зображення й трекінг рухів голови.

При створенні архітектурної VR-сцени важливими є поняття «полігонального бюджету» та «бюджету пам'яті». Перший визначає максимально допустиму кількість полігонів (трикутників чи вершини), що повинні бути відрендерені в кадрі так, щоб рушій міг підтримувати потрібний FPS без перевантаження GPU. Другий — це обмеження щодо обсягу текстур, даних про матеріали та інших графічних ресурсів, що зберігаються в оперативній та відеопам'яті; перевищення цього ліміту може призвести до підвисань чи артефактів під час роботи VR-додатку.

Специфіка стереоскопічного рендерингу у VR полягає в тому, що сцену необхідно відобразити двічі — для лівого та правого ока користувача, що фактично подвоює навантаження на графічний процесор у порівнянні з рендерингом на звичайному 2D-моніторі. Такий поділ зображення потрібен для створення глибини та відчуття простору, але він

змушує розробників ще ретельніше оптимізувати модель, аби уникнути просідань продуктивності чи надлишкового споживання пам'яті.

Конкретні технічні специфікації сучасних автономних VR-гарнітур, таких як Meta Quest 3 і Pico 4 Ultra, ілюструють обмеження, з якими стикаються розробники. Meta Quest 3 оснащена процесором Snapdragon XR2 Gen 2, 8 ГБ оперативної пам'яті та дисплеями з роздільною здатністю 2064×2208 на око і частотою оновлення до 120 Гц, що забезпечує плавну частоту кадрів у оптимізованих VR-сценах, але залишає обмежений бюджет для складної геометрії й текстурних наборів без оптимізації. Pico 4 Ultra пропонує 12 ГБ RAM і дисплеї 2160×2160 на око з частотою 90 Гц, що трохи розширює можливості для складних сцен, але все ще вимагає суворого контролю над полігональним та пам'яті бюджетами [95].

Алгоритми зменшення складності сцени є центральними у VR-оптимізації. Децимація (\$Decimation\$) — це автоматизований процес, який скорочує кількість трикутників у моделі шляхом агресивного усунення менш важливих вершин та ребер при збереженні загальної форми об'єкта. Такі методи особливо корисні для вторинних або фонових елементів, де дрібні деталі не критичні для сприйняття. Ще одним підходом є колапс ребер (edge collapse) — операція, яка послідовно зводить сусідні вершини в єдину, зменшуючи загальну кількість полігонів без значної зміни візуального силуету. Ці автоматичні методи швидкі, але можуть втратити важливі геометричні особливості, тому вони часто поєднуються з ручною корекцією.

Ручна ретопологія відрізняється від автоматичної тим, що художник або технічний артист переосмислює топологію моделі, створюючи нову полігональну структуру «з нуля» або на базі спрощеної автоматичної версії, але з урахуванням ключових нюансів архітектури. Це особливо важливо для складних архітектурних об'єктів зі специфічною формою або критичною геометрією, де автоматичні алгоритми можуть створити

артефакти чи втратити важливі контури. Ручна ретопологія дозволяє отримати якісну, оптимізовану сітку з контрольованою щільністю полігонів, що є критично для підтримки потрібного FPS і низької затримки в VR.

2.4.2 LOD та Draw Call

Динамічне керування деталізацією є одним із ключових механізмів забезпечення стабільної продуктивності у віртуальній реальності, особливо при роботі з великими та геометрично насиченими архітектурними об'єктами. На відміну від статичних сцен, VR-середовище передбачає постійний рух користувача та зміну точки огляду, що вимагає адаптивного підходу до відображення геометрії. Основною метою динамічної деталізації є зменшення навантаження на графічний процесор без помітної втрати візуальної якості шляхом регулювання складності об'єктів залежно від їхньої відстані до камери та ролі в композиції сцени.

Класичний алгоритм Level of Detail (LOD) базується на підготовці кількох копій одного й того самого об'єкта з різним рівнем геометричної складності. Для кожного об'єкта створюються LOD-рівні, наприклад LOD0 з максимальною деталізацією, LOD1 зі спрощеною геометрією та LOD2 або LOD3 для далеких дистанцій. Перемикання між цими рівнями відбувається автоматично залежно від відстані між об'єктом і камерою або від його розміру на екрані. Коли користувач наближається до об'єкта, рушій активує більш детальну версію, а при віддаленні — менш деталізовану. Такий підхід дозволяє зберегти високу якість у зоні безпосередньої взаємодії та значно скоротити кількість оброблюваних полігонів у периферійних ділянках сцени.

Для масштабних архітектурних сцен, таких як аеропорти чи замкові комплекси, класичний LOD часто є недостатнім, оскільки сцена складається з тисяч окремих елементів. У таких випадках застосовуються

дискретні та ієрархічні LOD-и (HLOD). Дискретний LOD працює на рівні окремих будівель або великих сегментів, дозволяючи замінювати цілі групи об'єктів спрощеними версіями. Ієрархічний LOD, у свою чергу, об'єднує групи мешів у більші агреговані об'єкти, які відображаються як єдине ціле на великих дистанціях. Наприклад, окремі стіни, башти й допоміжні будівлі замку можуть бути зведені в один спрощений HLOD-меш, що значно зменшує кількість викликів рендерингу та підвищує продуктивність без помітної втрати загального силуету.

Ключовим поняттям у цьому контексті є Draw Call — команда, яку CPU надсилає GPU для відображення одного меша з конкретним матеріалом. Кожен унікальний матеріал або окремий об'єкт зазвичай вимагає окремого draw call. У VR кількість допустимих draw calls істотно обмежена, оскільки сцена рендериться двічі. Велика кількість унікальних матеріалів і дрібних об'єктів призводить до перевантаження CPU та зниження FPS, що безпосередньо впливає на комфорт користувача. Саме тому оптимізація кількості draw calls є не менш важливою, ніж скорочення кількості полігонів.

Одним із базових підходів до зменшення draw calls є Static Mesh Combining, або об'єднання кількох статичних мешів в один. Ця методика ефективна для архітектурних елементів, які не потребують індивідуальної анімації чи взаємодії, наприклад фрагментів стін, підлог або декоративних деталей. Об'єднання дозволяє відобразити кілька об'єктів за один виклик, проте зменшує гнучкість при подальшому редагуванні. Альтернативним і більш масштабованим рішенням є використання Instanced Static Meshes, які дозволяють рендерити тисячі однакових об'єктів (крісла в залі очікування аеропорту, колони замку, ліхтарі або балки) за один draw call. У цьому випадку геометрія та матеріал зберігаються один раз, а рушій лише передає трансформації для кожного екземпляра, що суттєво скорочує навантаження на систему.

2.4.3 Важливість збереження чіткості текстур та використання ефективних методів

Робота з растровими даними є одним із центральних аспектів оптимізації тривимірних середовищ, особливо для архітектурних VR-проектів, де з одного боку необхідно забезпечити високу чіткість поверхонь при наближенні користувача, а з іншого — уникнути перевантаження обмежених ресурсів відеопам'яті (VRAM). Однією з ключових концепцій у текстурванні є Texel Density (щільність текселів), яка визначає кількість пікселів текстури (texels) на одиницю площі 3D-моделі. Щільність текселів прямо впливає на якість сприйняття поверхонь: висока щільність забезпечує фізично чітке зображення деталей, тоді як низька може призводити до розмитості при близькому огляді. Практично Texel Density розраховується як співвідношення роздільної здатності текстури до фактичних габаритів об'єкта у сцені, що дозволяє збалансувати деталізацію та ефективність використання пам'яті й уникати надлишкового запасу роздільної здатності там, де він не потрібний [96].

В умовах VR щільність текселів набуває ще більшого значення, оскільки користувач може вільно наближатися до поверхонь архітектурних об'єктів, і неоднорідні або неузгоджені значення Texel Density між частинами сцени порушують естетичну цілісність й сприйняття простору. Тому оптимальне розподілення щільності текселів планується відповідно до очікуваної відстані до поверхні та ролі об'єкта в сцені: частини, які користувач бачить здалеку, можуть мати нижчу щільність, а ключові, ближчі поверхні вищу [97].

Ефективним способом організації великого обсягу текстурних даних є створення текстурних атласів (texture atlases) — одного великого зображення, що містить багато дрібних текстур для різних поверхонь чи об'єктів. Алгоритм побудови атласу полягає у плануванні композиції

кількох маленьких текстур на єдиному полотні таким чином, щоб вони не перекривались, а кожен фрагмент UV-розгортки прив'язувався до відповідної області атласу. Це дозволяє суттєво зменшити кількість звернень до графічної пам'яті та кількість Draw Calls (поодиноких викликів рендерингу одного матеріалу), оскільки кілька об'єктів можуть використовувати одну спільну текстуру, замість того щоб мати власні [98].

Ще одним важливим методом є використання так званих “Trim Sheets” — спеціальних текстур, що представляють собою набір часто повторюваних декоративних елементів чи орнаментів, укладених у вузькі смуги або блоки, які можна UV-мапувати на багато різних об'єктів без створення окремої текстури для кожного. Trim Sheets особливо корисні при роботі з архітектурними деталями (карнизи, рамки, бордюри), де багато дрібних елементів повторюються по всій моделі. Такий підхід дозволяє економити пам'ять, оскільки один високоякісний файл містить багато декоративних елементів, які можна повторно застосовувати на різних поверхнях, і значно скорочує обсяг текстурних ресурсів, що завантажуються в VRAM, без втрати очевидної деталізації [99].

2.5 Робота над концепцією реконструкції Успенського собору

Процес віртуальної реконструкції Успенського собору в селі Крилос розпочинався з комплексного аналізу історико-архітектурного значення об'єкта та його актуального стану збереженості. Як одна з ключових пам'яток Галицько-Волинської держави, собор сьогодні існує переважно в археологічному вимірі, що зумовлює складність і водночас необхідність його візуальної ревіталізації за допомогою цифрових технологій. Початковий етап проектування передбачає формування цілісного інформаційного масиву, який інтегрує дані натурних обстежень, історичні гіпотези та результати попередніх наукових розвідок. Такий підхід забезпечує перехід від фізичних залишків фундаменту до обґрунтованої

цифрової моделі, яка здатна репрезентувати втрачену архітектурну спадщину в імерсивному середовищі.

Важливим компонентом підготовчої роботи є детальна систематизація графічних і фотографічних джерел, накопичених за останні десятиліття. Використання знімків різних років дозволяє зафіксувати динаміку змін ландшафту навколо пам'ятки та поточний консерваційний стан автентичних фрагментів фундаменту, що є критично важливим для точного позиціонування об'єкта в тривимірному просторі. Опорним документом у цьому процесі виступають креслення фундаментів, що базуються на результатах багаторічних археологічних експедицій. Ці матеріали формують метричну основу проєкту, визначаючи не лише зовнішні габарити споруди, а й складну внутрішню структуру опорних конструкцій, що стає відправною точкою для логічної надбудови вертикальних об'ємів у віртуальному середовищі.

Оскільки автентичний зовнішній вигляд собору не зберігся до нашого часу, проєктна частина значною мірою спирається на критичне переосмислення напрацювань архітекторів минулих періодів та сучасних дослідників. Аналіз результатів численних архітектурних конкурсів на реконструкцію пам'ятки дає змогу виявити основні тенденції у трактуванні фасадних рішень та об'ємно-просторових характеристик собору. Вивчення концептуальних планів, розрізів та ескізів, запропонованих провідними фахівцями, дозволяє синтезувати найбільш вірогідні архітектурні форми, враховуючи канони тогочасного будівництва та специфічні риси галицької архітектурної школи. Опрацювання цих матеріалів мінімізує суб'єктивізм у процесі моделювання та сприяє створенню науково верифікованої віртуальної моделі, що базується на синтезі багатьох фахових думок.

Вибір п'ятиверхого варіанту завершення собору як основної концепції для віртуальної реконструкції є результатом ретельного порівняльного аналізу існуючих архітектурних гіпотез. Дана конфігурація

дозволяє найбільш повно відобразити величність та композиційну складність пам'ятки, узгоджуючись із загальними принципами візантійсько-руської архітектурної традиції та її локальними інтерпретаціями. Саме ця об'ємна модель стає базою для подальшої деталізації архітектурних елементів, включаючи розробку декору, віконних прорізів та вхідних порталів. П'ятиверха структура не лише відповідає історичним та естетичним вимогам проєкту, а й створює складний візуальний ритм, що є важливим для подальшого аналізу сприйняття об'єкта користувачем в умовах віртуальної реальності.

Завершення етапу збору та систематизації матеріалів створює необхідні передумови для переходу до безпосереднього застосування алгоритмів цифрового моделювання та розробки VR застосунку.

РОЗДІЛ ІІІ. ПРОЄКТНА ЧАСТИНА

3.1 Відтворення геометрії історичної будівлі Успенського собору

3.1.1 Використання ПЗ Blender як основного засобу моделювання

Процес безпосереднього моделювання архітектурного об'єкта базується на використанні програмного середовища Blender, що обране як основний інструментарій завдяки його потужним можливостям у роботі з полігональною топологією та гнучкості при створенні складних історичних реконструкцій. Перехід від зібраних метричних даних до тривимірного тіла розпочинається з етапу блокінгу, який полягає у формуванні спрощеної геометричної маси споруди. На цій стадії за допомогою базових примітивів відтворюються основні об'єми собору відповідно до креслень фундаментів та обраної п'ятиверхої концепції. Головним завданням блокінгу є встановлення правильних пропорційних співвідношень між центральним нефом, апсидами та барабанами куполів, що дозволяє оцінити масштабність об'єкта ще до початку детального опрацювання окремих елементів.



Рис. 3.1.1.1 Блокінг моделі Успенського собору у ПЗ Blender

Після затвердження загальної композиційної структури розпочинається етап деталізації, на якому первинні форми поступово ускладнюються за допомогою інструментів екструдування, розрізання граней та модифікаторів. Особлива увага приділяється відтворенню специфічних архітектурних деталей, характерних для давньоруського зодчества, таких як віконні прорізи, портали та декоративні аркатурні пояси. Робота з геометрією вимагає дотримання суворої топологічної чистоти, оскільки будь-які дефекти сітки можуть призвести до артефактів під час візуалізації у середовищі віртуальної реальності. Процес моделювання передбачає постійну звірку з аналогами та конкурсними пропозиціями архітекторів для забезпечення максимальної достовірності пластики фасадів та їхнього ритмічного наповнення.

Технічний аспект підготовки моделі до імерсивного використання включає ретельну роботу з розгорткою текстурних координат та орієнтацією нормалей поверхонь. Налаштування UV-розгортки здійснюється за принципом мінімізації спотворень та раціонального використання простору текстурного атласу. Це критично важливо для подальшого накладання матеріалів, що імітують білокам'яну кладку собору та покрівлю куполів. Окремий акцент ставиться на корекції нормалей, що забезпечує правильне розсіювання світла на поверхнях об'єкта. Використання інструментів для вирівнювання нормалей та застосування груп згладжування дозволяє досягти візуальної м'якості криволінійних форм барабанів та апсид без надмірного збільшення кількості полігонів, що є ключовим для продуктивності віртуальних систем.

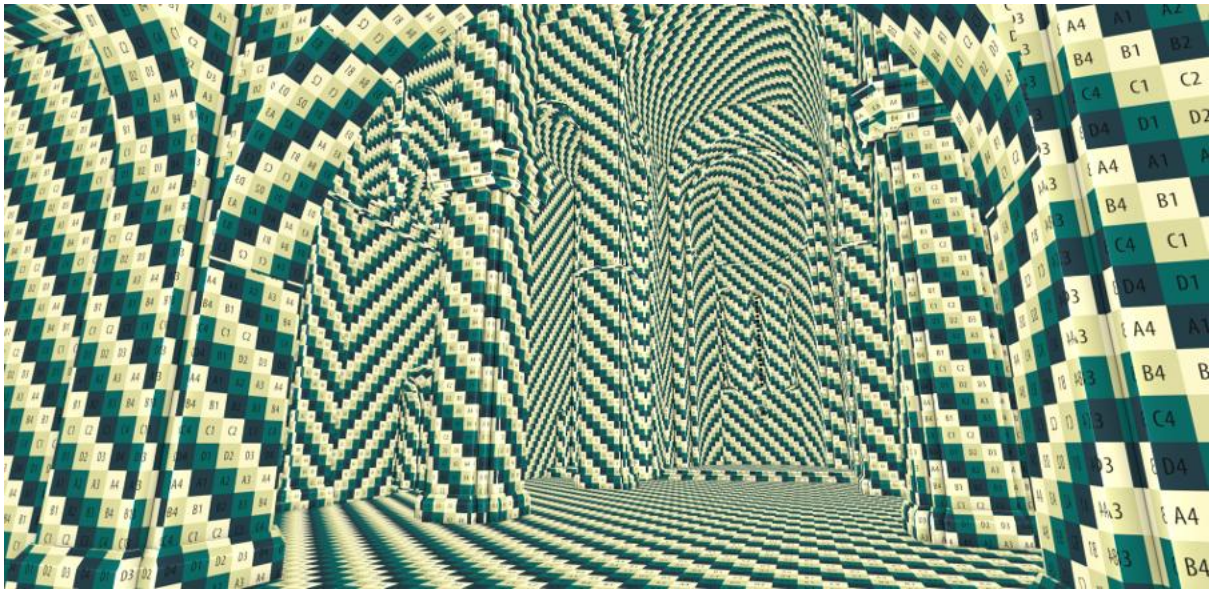


Рис. 3.1.1.2 Режим відображення коректної UV-розгортки оптимальної для накладання текстур у рушії

Завершальна стадія роботи в Blender присвячена фінальній оптимізації моделі, яка повинна відповідати технічним вимогам сучасних графічних рушіїв. Оскільки віртуальна реальність передбачає високу частоту оновлення кадрів, кількість трикутників у моделі собору підлягає суворому контролю. Процес оптимізації охоплює видалення невидимих внутрішніх граней, об'єднання дубльованих вершин та використання методів ретопології для складних декоративних елементів. Створення оптимальної ієрархії об'єктів усередині моделі та підготовка рівнів деталізації дозволяють збалансувати візуальну насиченість реконструкції з високою швидкістю рендерингу. Таким чином, цифрова модель Успенського собору перетворюється на цілісний технологічний об'єкт, готовий до інтеграції в інтерактивне віртуальне середовище.

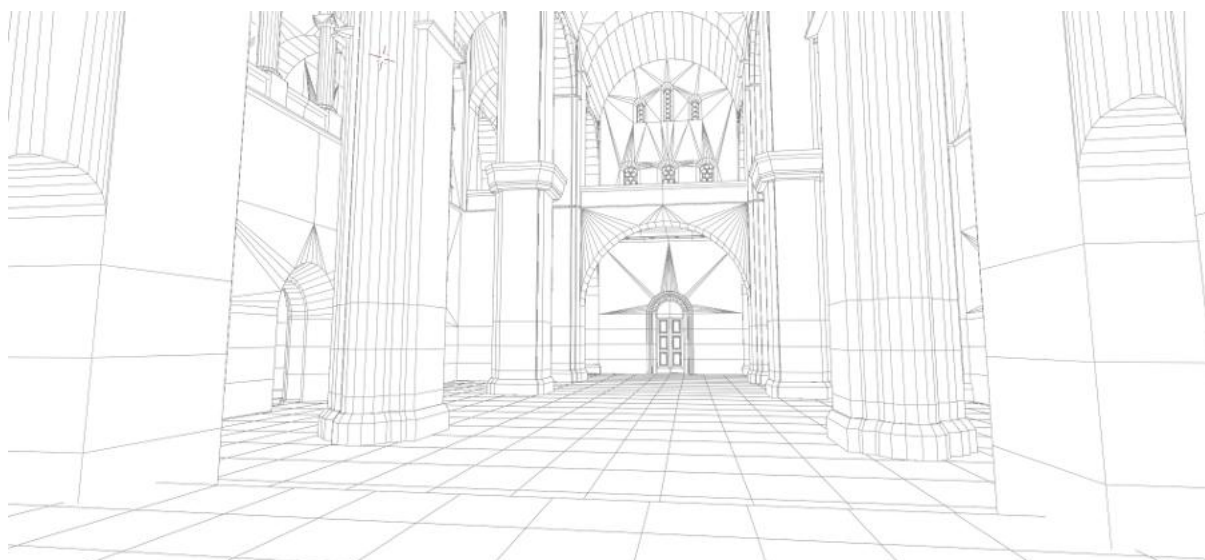


Рис. 3.1.1.3 Режим відображення оптимізованої сітки собору

3.1.2 Запікання та текстурування плитки із зображенням грифонів

Окремим етапом віртуальної реконструкції є детальне опрацювання автентичних елементів декору, зокрема керамічної плитки із рельєфним зображенням грифона, що є знаковим символом давнього Галича. Процес створення цього елемента розпочався з імпорту вихідної геометрії з ArchiCAD до середовища Blender, де складна топологія декоративного рельєфу була підготовлена для подальшого перенесення деталей. З метою оптимізації моделі для віртуальної реальності було прийнято рішення про використання технології запікання високої деталізації на плоску низькополігональну поверхню, що дозволяє зберегти візуальну пластику артефакту при мінімальних обчислювальних витратах.

Для досягнення максимальної точності передачі мікрорельєфу було використано спеціалізоване програмне забезпечення Marmoset Toolbag. У цьому середовищі відбувався процес генерації карт високої роздільної здатності з високої на низьку геометрію, що дозволило перенести всі нюанси об'ємного зображення грифона на один полігон. Отримані карти нормалей забезпечили коректне відтворення гри світла та тіні на поверхні

плитки, імітуючи реальний об'єм без фізичного ускладнення сітки моделі. Такий підхід є критично важливим для збереження продуктивності системи при перегляді об'єкта в імерсивному режимі.

Подальше текстурування здійснювалося у пакеті Substance Painter, де на основі запечених даних формувався фінальний вигляд матеріалу. Використання карт Normal, Ambient Occlusion та Curvature дозволило акцентувати увагу на заглибленнях та виступах рельєфу, додаючи моделі візуальної глибини та реалізму. На основну форму було накладено текстуру каменю з відповідними картами шорсткості та дифузії, що відтворюють специфічну фактуру давньої кераміки. Завдяки інтеграції результатів запікання з Marmoset безпосередньо в шари Substance Painter, вдалося досягти органічного поєднання геометрії та текстурних ефектів, перетворюючи плитку на високореалістичний PBR матеріал.



Рис. 3.1.2.1 Запечена текстура, відображення карт кольору, нормалей та шорсткості

3.1.3 Скульптинг барельєфу із зображенням дракона

Особлива увага приділялася відтворенню окремих елементів, що мають виразне історичне та художнє значення. Серед таких артефактів

виділяється барельєф із зображенням дракона, що дихає вогнем (димом), знайдений в Успенській церкві Галича. Цей фрагмент середньовічного каменяряства є унікальним свідченням декоративно-прикладного мистецтва епохи, і його віртуальна реставрація є важливою для повноцінного відтворення автентичної атмосфери споруди.

Процес моделювання барельєфа розпочався з аналізу фотографічного зображення кам'яної плити, що збереглася. Це пласке двовимірне джерело слугувало основним референсом для відтворення пластики та дрібних деталей скульптури. Для перетворення двовимірного образу на об'ємну модель було використано техніку скульптинг-моделювання безпосередньо у програмному середовищі Blender, що дозволяє працювати з мільйонами полігонів для досягнення високої деталізації.

Першим етапом було імпортування зображення дракона як фонового полотна для скульптингу. На його основі створювалася базова сітка, що поступово модифікувалася за допомогою інструментів ліплення. Процес розпочинався з грубого формування основних об'ємів та контурів дракона, поступово переходячи до витончення деталей, таких як луска, паща, очі та стилізація вогню. На цьому етапі активно використовувався модифікатор Subdivision Surface (Subd), що дозволяв нарощувати щільність сітки у міру необхідності для опрацювання дрібних елементів без втрати загальної форми.

Після досягнення необхідного рівня деталізації моделі, яка налічувала значну кількість полігонів, застосовувався інструмент Remesh. Це дозволяло створити однорідну та чисту топологію, що є оптимальною для подальшої обробки та запікання текстур. У процесі ремешування відбувалося перерозподілення полігонів, що спрощувало подальші маніпуляції з моделлю та покращувало її візуальне сприйняття.

Завершальним етапом моделювання було використання модифікатора Decimate. Його застосування дозволило знизити загальну кількість полігонів моделі без суттєвої втрати візуальної якості. Цей крок є критично важливим для оптимізації моделі для середовищ віртуальної реальності, де продуктивність системи залежить від кількості оброблюваних трикутників. В результаті децимації було збережено ключові особливості рельєфу, а модель стала придатною для інтеграції в ігровий рушій. Оригінальне зображення кам'яної плити було збережено як основа для текстури, яка буде накладена на оптимізовану модель, забезпечуючи високу відповідність віртуального об'єкта його історичному прототипу.



Рис. 3.1.3.1 Зображення барельєфу створеного за допомогою методів скульптингу

3.2 Імпорт у Unreal Engine. Налаштування візуального середовища собору: матеріали, шейдери та алгоритми освітлення.

Фінальним етапом реалізації проєкту є інтеграція підготовлених асетів у середовище Unreal Engine 5, що дозволяє перетворити статичні моделі на імерсивний інтерактивний простір. Процес перенесення даних із

Blender до ігрового рушія здійснюється з використанням формату .glTF, який забезпечує коректну передачу геометрії, текстурних координат та метаданих матеріалів. При імпорті особлива увага приділяється масштабуванню об'єктів, оскільки розбіжності в одиницях вимірювання між програмами моделювання та рушієм можуть порушити коректне сприйняття архітектурного об'єкта в VR. Виправлення розмірів та приведення їх до реальних метричних показників є критично важливим для забезпечення правильного відчуття простору та висоти собору користувачем. У даному випадку, через різницю одиниць вимірювання між програмним забезпеченням було застосовано збільшення моделі у 100 разів.

Для оптимізації рендерингу та підтримки стабільно високої частоти кадрів у віртуальній реальності використовується інструментарій Unreal Engine для генерації рівнів деталізації (LOD). Автоматизована система створення лодів дозволяє рушію динамічно знижувати складність геометрії об'єктів залежно від відстані до камери спостерігача. Це особливо актуально для складних елементів, таких як п'ятиверхе завершення собору чи деталізовані барельєфи, оскільки дозволяє раціонально розподіляти ресурси графічного процесора без помітної втрати візуальної якості сцени.

Розміщення об'єктів у сцені виконується з урахуванням ландшафтного контексту та просторової орієнтації фундаментів Успенського собору. Після інстанціювання архітектурних модулів та декоративних елементів, проводиться налаштування освітлення та колізій. Колізійні оболонки дозволяють обмежити пересування користувача, запобігаючи проходженню крізь стіни та забезпечуючи природну взаємодію з віртуальною архітектурою. Паралельно здійснюється перевірка орієнтації нормалей та коректності відображення матеріалів при динамічному освітленні рушія.

Наступним кроком є конфігурація базових функцій для роботи у віртуальній реальності за допомогою VR Template або спеціалізованих плагінів. Налаштування включає активацію стереоскопічного рендерингу, встановлення параметрів телепортації для пересування великою територією собору та визначення висоти камери, що відповідає росту людини. Окремо опрацьовуються параметри згладжування та оптимізації тіней, щоб мінімізувати візуальні шуми, які можуть спричинити дискомфорт під час тривалого перебування у VR. У результаті проведених маніпуляцій створюється стабільне та високотехнологічне середовище, де наукова реконструкція собору набуває форми доступного для дослідження віртуального простору.

Формування візуального середовища Успенського собору в Unreal Engine 5 вимагає ретельного налаштування системи матеріалів та освітлення, що безпосередньо впливає на рівень імерсивності та історичної достовірності об'єкта. Основним завданням на цьому етапі є створення переконливої імітації фізичних властивостей поверхонь, таких як камінь стін, фактура підлоги, волокна дерева, а також специфічне заломлення світла у склі та відблиски на металевих елементах. Для кожного типу матеріалу розроблялися індивідуальні шейдери, що враховують шорсткість, металевість та особливості віддзеркалення навколишнього середовища, що дозволяє досягти візуальної різноманітності інтер'єру та екстер'єру споруди.

Особлива увага в процесі текстурування стін та підлоги приділялася використанню карт Ambient Occlusion (AO), які інтегрувалися безпосередньо в шейдери. Цей алгоритм дозволяє імітувати природне затінення у кутах, тріщинах та місцях примикання архітектурних елементів, додаючи моделі візуальної глибини та цілісності. Застосування ефектів оклюзії є критично важливим для архітектурної візуалізації, оскільки воно компенсує відсутність складних прорахунків глобального

освітлення в реальному часі, підкреслюючи об'ємність конструкцій та роблячи стики між окремими блоками фундаменту чи стін більш природними.

Стратегія освітлення віртуальної сцени базується на ієрархічному поєднанні глобального джерела та локальних акцентів. Роль основного світла виконує Directional Light, що імітує сонячне випромінювання, задаючи загальний тон сцени та напрямок основних тіней. Однак, враховуючи специфіку нативних технологій віртуальної реальності, які часто демонструють обмеження в обробці якісного м'якого освітлення в реальному часі, виникає потреба у додатковій ручній корекції світлового середовища. Пряме сонячне світло без додаткової обробки створює надмірно різкі тіні та плоскі переходи, що негативно впливає на сприйняття простору користувачем.

Для досягнення високого рівня реалізму та плавних світлових градієнтів використовується розгалужена мережа точкових джерел світла (Point Lights), що виконують функцію "фейкового" або заповнюючого освітлення. Ці допоміжні джерела розміщуються в стратегічно важливих зонах собору для пом'якшення глибоких тіней та створення ефекту вторинного відскоку світла від поверхонь. Такий підхід дозволяє вручну моделювати складне світлотіньове середовище, характерне для масивних кам'яних споруд, забезпечуючи візуальний комфорт та глибину сцени, які зазвичай доступні лише при використанні ресурсномістких алгоритмів трасування променів.



Рис. 3.2.1 Відображення моделі у рушії з налаштованими матеріалами та освітленням

3.3 Інтеграція другорядних об'єктів в середовищі собору

Доповнення віртуального простору об'єктами другого плану є необхідним кроком для переходу від абстрактної архітектурної моделі до повноцінної історичної реконструкції, що передає масштаб та функціональне призначення споруди. Наповнення середовища базується на принципах історичної відповідності періоду X–XV століть, що вимагає ретельного добору предметів інтер'єру та екстер'єру. До обов'язкових елементів, інтегрованих у сцену, належать автентичні лави масивної конструкції, виготовлені з грубо обробленого дерева, що відповідають тогочасним технологіям теслярства. Важливе місце посідає також система освітлення, реалізована через моделі підлогових та настінних свічників, а також панікадил, що за формою та матеріалами (коване залізо, мідь) відтворюють зразки середньовічного освітлювального приладдя. Ці об'єкти не лише насичують простір деталями, а й виступають маркерами

для візуального порівняння розмірів, дозволяючи користувачеві підсвідомо оцінювати висоту склепінь та ширину нефів.

Процес розміщення другорядних об'єктів у середовищі Unreal Engine 5 супроводжується налаштуванням їхньої взаємодії з глобальним та локальним освітленням. Для металевих елементів світильників та дерев'яних поверхонь меблів створюються окремі карти шорсткості та металевості, що забезпечує коректні відблиски від полум'я свічок або сонячних променів, які проникають крізь вузькі віконні отвори. Таке мікрорівневе наповнення сцени критично важливе для VR-досвіду, оскільки в імерсивному середовищі користувач має можливість наближатися до об'єктів на мінімальну відстань, що висуває високі вимоги до якості текстур та геометричної деталізації дрібних елементів.

У контексті подальшого розвитку проєкту та розширення його експозиційного потенціалу доцільним є розгляд об'єктів, що не є обов'язковими для базової архітектурної візуалізації, проте суттєво поглиблюють імерсію. До таких перспективних елементів належать об'єкти церковного наповнення, декоративні тканини та гобелени, що могли прикрашати стіни собору, а також елементи монументального живопису, відтворення яких потребує окремих мистецтвознавчих розвідок. Додавання звукового супроводу, зокрема записів тогочасних літургійних піснеспівів або акустичних ефектів кроків по кам'яній підлозі, може стати наступним кроком у мультимодальному аналізі віртуального об'єкта.

Перспективним напрямом розширення середовища є також візуалізація прилеглої до собору території, що включає елементи оборонних споруд, житлової забудови літописного Галича та природного ландшафту. Впровадження динамічних об'єктів, таких як частинки диму від свічок або пилу в сонячних променях (VFX), дозволить оживити статичну модель, перетворюючи її на цілісну екосистему. Такі додатки, хоч і потребують значних обчислювальних ресурсів, дозволяють перетворити

віртуальну реконструкцію з суто наукового інструменту на повноцінний освітній та туристичний продукт, що демонструє велич Успенського собору в усій повноті його історичного контексту.

3.4 Реалізація інтерактивної взаємодії користувача

Реалізація системи навігації у віртуальному просторі Успенського собору базується на забезпеченні максимального комфорту користувача та запобіганні виникненню симптомів кінетозу. Основним методом пересування обрано систему телепортації, яка реалізується через розрахунок параболічної траєкторії від контролера до точки перетину з навігаційною сіткою (NavMesh). Такий алгоритм дозволяє миттєво змінювати позицію спостерігача, що мінімізує конфлікт між візуальним сприйняттям руху та вестибулярним апаратом. Налаштування телепортації передбачає візуалізацію цільового маркера та плавне згасання екрана (fade effect) під час переходу, що сприяє збереженню просторової орієнтації в межах масштабного інтер'єру собору.

Альтернативним методом взаємодії є плавне пересування (smooth locomotion), що імітує природну ходу за допомогою аналогових стіків контролера. Цей режим налаштовується із застосуванням динамічного обмеження поля зору користувача під час руху, що дозволяє зменшити інтенсивність периферійних візуальних стимулів.

Технічне впровадження інтерактивності в Unreal Engine 5 передбачає програмування логіки взаємодії через систему Blueprints, де визначаються параметри швидкості, висоти камери та зони доступу. Налаштування колізій для архітектурних об'єктів забезпечує фізичну коректність пересування, не дозволяючи користувачеві проходити крізь стіни або за межі реконструйованої території. Інтеграція цих алгоритмів перетворює статичну модель на динамічне дослідницьке середовище, де користувач

отримує повний контроль над процесом вивчення архітектурного об'єкта, адаптуючи спосіб навігації під власні потреби та особливості сприйняття.

Процес налаштування інтерактивного середовища вимагає точної відповідності між візуальною геометрією собору та його фізичними межами, що реалізується через генерацію колізій. Оскільки модель Успенського собору має складну архітектурну форму з численними заглибленнями та порталами, стандартні примітиви колізій часто виявляються недостатніми. Для забезпечення коректної взаємодії в Unreal Engine 5 застосовується метод генерації колізій на основі вихідної меш-геометрії (Complex as Simple), що дозволяє гравцеві точно відчувати межі стін та фундаментів. У випадках, де необхідна оптимізація продуктивності, використовуються алгоритми опуклих оболонок (Convex Decomposition), які апроксимують складну форму собору набором спрощених об'ємів, що значно знижує навантаження на фізичний рушій без втрати точності зіткнень.

На основі сконструйованих колізій здійснюється побудова навігаційної сітки (NavMesh), яка визначає зони, доступні для переміщення користувача. Алгоритм генерації NavMesh аналізує всі горизонтальні та похилі поверхні, враховуючи параметри агента, такі як радіус капсули гравця, максимально допустимий кут нахилу та висоту сходинок. Це дозволяє автоматично відсікти недоступні ділянки, наприклад, зони під низькими склепіннями або вертикальні фрагменти зруйнованих стін, куди користувач не повинен потрапити. Навігаційна сітка виступає фундаментом для системи телепортації: маркер переміщення активується лише у межах згенерованого NavMesh, що гарантує безпеку навігації та запобігає виходу за межі ігрового простору.



Рис. 3.4.1 Відображення режиму NavMesh, де зелений колір відображає доступні для переміщення горизонтальні площини

Інтеграція системи колізій та навігаційної сітки забезпечує логічну цілісність віртуальної реконструкції. Завдяки динамічному оновленню NavMesh при зміні параметрів об'єктів, є можливість гнучко коригувати маршрути екскурсії собором, відкриваючи або закриваючи доступ до певних археологічних зон. Таке поєднання фізичних обмежувачів та навігаційних алгоритмів створює надійний каркас для імерсивного досвіду, де кожен крок користувача у віртуальному просторі відповідає фізичній логіці архітектурного об'єкта.

3.5 Компіляція VR застосунку та процес тестування

Процес компіляції віртуального застосунку для автономних гарнітур Oculus та Pico вимагає попереднього налаштування програмного стека, що забезпечує коректну взаємодію між Unreal Engine 5 та апаратною частиною пристрою. Першочерговим кроком є інтеграція та конфігурація Android SDK (Software Development Kit) та NDK (Native Development Kit) відповідних версій, що дозволяє рушію транслювати архітектурну сцену у

формат, придатний для виконання на мобільних чипсетах гарнітур. У налаштуваннях проєкту встановлюється орієнтація на платформу Android із вибором конкретних графічних рівнів (Vulkan або OpenGL ES), а також проводиться ідентифікація пристрою через активацію режиму розробника. Фінальна підготовка охоплює налаштування цифрових підписів та пакування всіх асетів, від масштабної моделі собору до деталізованих барельєфів, у цілісний інсталяційний файл.

Етап тестування розпочинається з первинного запуску застосунку безпосередньо на окулярах для оцінки продуктивності та візуальної відповідності. Основна увага під час перевірки приділяється стабільності частоти кадрів (FPS), оскільки будь-які затримки в рендерингу архітектурного середовища можуть спричинити дискомфорт у користувача. Важливим аспектом тестування є верифікація масштабування: перебуваючи всередині віртуального собору, дослідник оцінює відповідність висоти склепінь та габаритів інтер'єру людському зросту, що було закладено на етапі моделювання в Blender. Окремо перевіряється коректність роботи тригерів телепортації та точність колізій, щоб унеможливити застрягання користувача в геометрії фундаментів або проходження крізь стіни.

У ході тестування було виявлено та усунуто низку технічних помилок, характерних для складних архітектурних реконструкцій. Однією з основних проблем стала надмірна інтенсивність "фейкового" освітлення, що призводило до пересвітів на текстурах каменю в окулярах, хоча на моніторі ПК зображення виглядало коректним; це потребувало додаткового коригування експозиції та інтенсивності точкових джерел світла. Виявлені помилки в навігаційній сітці (NavMesh), які обмежували доступ до певних частин собору, було усунуто через уточнення параметрів прохідності агента та перерахунку навігаційної сітки. У результаті ітераційного тестування вдалося досягти стабільної роботи застосунку, забезпечивши

плавний та реалістичний досвід перебування у відтвореному просторі
Успенського собору.

РОЗДІЛ IV. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЦИВІЛЬНИЙ ЗАХИСТ

4.1 Загальні положення про охорону праці

Охорона праці в Україні регулюється Законом України «Про охорону праці» від 14 жовтня 1992 року № 2694-ХІІ (в редакції від 12 вересня 2025 року), який визначає основні положення щодо реалізації конституційного права громадян на охорону їх життя і здоров'я у процесі трудової діяльності [100].

Ключові принципи охорони праці, закріплені у законодавстві України, включають: пріоритет життя і здоров'я працівників над економічними інтересами, що означає безумовне забезпечення безпечних умов праці як найважливішого завдання роботодавця; повну відповідальність роботодавця за створення безпечних і нешкідливих умов праці; комплексне вирішення завдань охорони праці на основі загальнодержавної, галузевих, регіональних програм з цих питань та з урахуванням інших напрямів економічної і соціальної політики; соціальний захист працівників, повне відшкодування шкоди особам, які потерпіли від нещасних випадків на виробництві і професійних захворювань; встановлення єдиних нормативів з охорони праці для всіх підприємств та суб'єктів підприємницької діяльності; використання економічних методів управління охороною праці, участь держави у фінансуванні заходів щодо охорони праці; інформування населення, проведення навчання, професійної підготовки і підвищення кваліфікації працівників з питань охорони праці; забезпечення координації діяльності державних органів, установ, організацій та об'єднань громадян, що розв'язують проблеми охорони здоров'я, гігієни та безпеки праці.

4.2 Специфічні вимоги охорони праці при використанні VR-окулярів

Використання VR-гарнітур в архітектурній практиці створює специфічні ризики для здоров'я та безпеки як архітекторів, так і клієнтів, що вимагає розробки спеціалізованих заходів охорони праці. Міжнародні стандарти безпеки, зокрема UL 8400 «Standard for Safety for Virtual Reality, Augmented Reality and Mixed Reality Technology Equipment», розроблений організацією UL Standards & Engagement, визначають вимоги до зменшення ризиків сенсibilізації шкіри, теплового впливу на очі, морської хвороби, нудоти/блювання та неврологічних ефектів [101]. Стандарт включає методи тестування для визначення, чи може яскравість дисплея пошкодити сітківку очей, або чи може пінний матеріал гарнітури викликати алергічні реакції чи свербіж.

Основні ризики для здоров'я при використанні VR-гарнітур включають: Візуальні порушення: напруження очей, подвійний зір, розфокусування, що можуть тривати годину і довше після завершення сеансу VR; близько 6% користувачів відчувають стійкі візуальні симптоми після використання VR [102]. Проблема IPD (Interpupillary Distance — міжзінничної відстані) особливо актуальна: більшість VR-гарнітур налаштовані на діапазон 58–72 мм, тоді як у частини дорослих користувачів IPD може бути меншим або більшим, що призводить до дискомфорту та головних болів.

Кіберхвороба (cybersickness): симптоми, подібні до морської хвороби: нудота, запаморочення, дезорієнтація, надмірне потовиділення, блідість шкіри. Ці симптоми можуть з'являтися не під час, а через кілька годин після використання VR-гарнітури. Дослідження Університету Каліфорнії показують, що користувачі більш сприйнятливі до VR-індукованої кіберхвороби, ніж до традиційної морської хвороби.

Фотосенситивні епілептичні напади: приблизно 1 з 4000 людей може відчувати сильне запаморочення, судоми, посмикування очей або м'язів, або втрату свідомості, спричинені спалахами світла або візерунками; ці реакції частіше трапляються у дітей та молодих людей віком до 20 років [103].

Скелетно-м'язові розлади: тривале носіння VR-гарнітури (вага Meta Quest 3 становить близько 515 г) може призвести до напруження шиї, болю в плечах та спині.

Теплове навантаження: при тривалому використанні VR-гарнітура та мобільний пристрій можуть перегріватися, викликаючи дискомфорт або опіки при тривалому контакті зі шкірою.

Шкірне подразнення: пінний матеріал, що безпосередньо контактує зі шкірою обличчя, може викликати алергічні реакції, свербіж або дерматит навіть при короткострокових сеансах.

Рекомендовані заходи безпеки для роботодавців та користувачів:

Обмеження тривалості сеансів: для професійного використання в архітектурних студіях рекомендується максимальна тривалість безперервного сеансу 30 хвилин з обов'язковими перервами 10–15 хвилин між сеансами [104]. Для клієнтів, що вперше використовують VR, початкова тривалість не повинна перевищувати 10–15 хвилин з поступовим збільшенням до 30 хвилин. ClassVR рекомендує максимальну тривалість для дітей до 10 хвилин, що також підтверджено рекомендаціями оптометристів.

Правило 20-20-20 для захисту зору: кожні 20 хвилин роботи у VR користувач повинен дивитися на об'єкт на відстані 20 футів (близько 6 метрів) протягом 20 секунд для зменшення напруження очей.

Налаштування гарнітури: перед кожним використанням необхідно правильно відрегулювати IPD (міжзіничну відстань), підігнати ремінці для рівномірного розподілу ваги та відцентрувати лінзи. Meta Quest 3 пропонує

З фіксовані позиції IPD, тоді як Pico 4 Ultra має плавне регулювання від 62 до 72 мм. Неправильне налаштування IPD може призвести до подвійного зору, головного болю та швидкої втоми.

Використання в сидячому положенні: новим користувачам VR настійно рекомендується залишатися в сидячому положенні під час сеансів для запобігання дезорієнтації, кіберхворобі та проблемам з балансом. Стояче використання дозволяється лише після адаптації та для застосунків, що явно вимагають цього.

Безпечне середовище: VR-простір повинен мати мінімум 2×2 метри вільного простору без перешкод (меблі, проводи, домашні тварини, інші люди). Обов'язково перевірити простір над головою (вентилятори, лампи). Використовувати VR тільки в приміщеннях, ніколи на вулиці або біля сходів.

Медичні протипоказання: не рекомендується використовувати VR-гарнітури вагітним, людям похилого віку, особам з порушеннями зору або психіатричними розладами, серцевими захворюваннями, схильністю до морської хвороби, проблемами з балансом або мігрєнями без попередньої консультації з лікарем [105].

Протокол екстреного реагування при виникненні симптомів:

Негайно зупинити використання VR-гарнітури при появі будь-якого з наступних симптомів: судоми, втрата свідомості, напруження очей, посмикування очей або м'язів, мимовільні рухи, змінений або розмитий зір, запаморочення, дезорієнтація, порушення балансу, порушення координації рук та очей, надмірне потовиділення, посилене слиновиділення, нудота, легке запаморочення, дискомфорт або біль у голові або очах, сонливість або втома.

Зняти гарнітуру, сісти в безпечному місці з закритими або відкритими очима до повного зникнення симптомів.

Не керувати транспортними засобами та не працювати з важкими механізмами відразу після використання VR, симптоми можуть посилюватися через кілька годин після використання.

Якщо симптоми тривають більше 2 годин або є серйозними — звернутися до медичного фахівця.

Документувати інцидент для подальшого аналізу та вдосконалення процедур безпеки на робочому місці.

4.3 Інклюзивність та доступність VR-технологій

Забезпечення доступності VR-технологій для людей з обмеженими можливостями є не лише етичним імперативом, а й юридичною вимогою згідно з міжнародними стандартами, зокрема Конвенцією ООН про права осіб з інвалідністю, ратифікованою Україною у 2009 році. Дослідження показують, що приблизно 15–20% глобальної популяції живе з тією чи іншою формою інвалідності, що становить значну користувацьку базу, яку не можна ігнорувати [106]. Лабораторне дослідження з 60 учасниками з Великої Британії, що представляли широкий спектр потреб доступності, виявило значні показники виключення при використанні VR та AR без спеціальних адаптацій, але також продемонструвало істотне покращення при наданні асистентських технологій та адаптацій [107].

Ключові категорії доступності для VR включають:

Користувачі з порушеннями зору: технології як SeeingVR (Microsoft Research) пропонують візуальні посилення: збільшення масштабу, підвищення яскравості або контрасту, обведення та підсвічування об'єктів, інверсія кольорів, вимірювання глибини об'єктів, напрямні лінії та відображення об'єктів поза центром зору користувача [108]. Аудіо-описові шари нарративно описують ключові візуальні елементи, дозволяючи сліпим або слабозорим користувачам слідкувати за симуляціями. Просторовий

звук (spatial audio) надає напрямні підказки, допомагаючи користувачам орієнтуватися в 3D-просторі.

Користувачі з порушеннями слуху: субтитри та візуальні підказки є критичними для користувачів, глухих або з порушеннями слуху. VirtualSpeech включає опціональні субтитри у навчальних сценаріях. Інші підходи включають вбудовані аватари, що перекладають мову жестів (як демонструє ASL Champ), транскрипції в реальному часі та тактильний зворотний зв'язок як заміну аудіо-підказкам [109]. Scoping review 2015–2025 років виявив, що найпоширенішими контекстами AR/VR для глухих є бібліотеки (орієнтація та зменшення тривожності), культурні досвіди з імерсивними субтитрами, технічне навчання з AR та мовою жестів [110].

Користувачі з фізичними обмеженнями: налаштовувані контролери дозволяють користувачам адаптувати конфігурації під свої специфічні потреби, включаючи можливість використання однією рукою. Критичним є сумісність VR-гарнітур з існуючими допоміжними технологіями (перемикачі, комунікаційні пристрої тощо), що залишається недостатньо дослідженою областю [111]. Тактильний зворотний зв'язок через рукавички або контролери з вібрацією симулює відчуття дотику, додаючи новий рівень імерсії та доступності для користувачів з порушеннями зору.

Користувачі з когнітивними особливостями: складні взаємодії та швидка обробка інформації у VR можуть бути когнітивно навантажувальними. Методологія проєктування доступних VR-досвідів для осіб з розладами аутистичного спектру (РАС) базується на трьох ключових принципах: модульність, передбачуваність та увага [112]. Дослідження порівняло VR-досвід на основі цих принципів з традиційним музейним відвідуванням, продемонструвавши значні переваги VR.

4.4 Цивільний захист

В умовах воєнного стану в Україні питання цивільного захисту набувають особливої актуальності при організації робочих процесів з використанням VR-технологій. Архітектурні студії та організації, що використовують VR для презентацій клієнтам, повинні враховувати специфічні ризики, пов'язані з обмеженою мобільністю користувачів у VR-гарнітурах під час повітряних тривог. Рекомендується:

Проводити інструктаж користувачів VR щодо процедур евакуації перед початком сеансу.

Призначати відповідальну особу, яка не перебуває у VR, для моніторингу повітряних тривог та негайного сповіщення користувачів у разі необхідності евакуації.

Обмежувати використання VR під час підвищеного ризику повітряних тривог.

Забезпечувати швидке та безпечне зняття VR-гарнітур у разі екстреної ситуації.

ВИСНОВКИ

У процесі роботи над кваліфікаційним проектом було виконано комплексне дослідження алгоритмів створення та методів аналізу архітектурних об'єктів у віртуальній реальності. Проведений аналітичний огляд продемонстрував динамічний розвиток VR-технологій в архітектурній галузі. Системний підхід до вивчення сучасних тенденцій виявив активне впровадження імерсивних технологій провідними архітектурними бюро, що підтверджує практичну значущість обраного напрямку дослідження.

Світовий досвід показує нам, що методологія наукової віртуальної реконструкції базується на міжнародних стандартах. Було встановлено, що ефективна реконструкція історичних об'єктів вимагає інтеграції археологічних даних з сучасними технологіями цифрового моделювання, включаючи лазерне сканування, фотограмметрію та процедурне моделювання. Дослідження продемонструвало критичну важливість прозорості джерел інформації у процесі віртуальної реконструкції культурної спадщини.

Було створено детальний огляд існуючих програмних рішень та класифікацію методів 3D-моделювання, що виявив фундаментальні відмінності між CAD-системами та ігровими рушіями. Аналіз показав перевагу Unreal Engine для створення VR-застосунків завдяки підтримці Ray-Tracing, Nanite та Lumen технологій, які забезпечують фотореалістичну візуалізацію в режимі реального часу. Практична реалізація проекту включала віртуальну реконструкцію історичної будівлі Успенського собору, що дозволило спробувати різні методики роботи з архітектурною геометрією.

Розроблено та впроваджено методи оптимізації 3D-об'єктів та текстур для забезпечення продуктивності VR-застосунку, включаючи використання технологій LOD (Level of Detail), оптимізацію draw calls,

ретопологию складної геометрії та ефективне управління розміром текстур. Особливу увагу приділено процесу експортування моделей з ArchiCAD та їх адаптації для ігрового рушія, що включало декомпозицію складних об'єктів, перерахунок нормалей та налаштування UV-розгортки. У процесі роботи з історичним об'єктом було застосовано техніки скульптингу для створення барельєфів, процедурне запікання текстур та імплементацію фізично коректних матеріалів (PBR).

Реалізовано інтерактивну VR-сцену з підтримкою навігації користувача, динамічного освітлення та системи взаємодії з об'єктами середовища. Проведено компіляцію та тестування застосунку на обладнанні Meta Quest та Pico 4 Ultra, що підтвердило технічну життєздатність розробленого рішення. Додатково досліджено питання охорони праці при використанні VR-технологій, включаючи ергономічні вимоги, профілактику кіберхвороби та принципи інклюзивного дизайну для користувачів з різними особливими потребами. Результати роботи демонструють можливість створення науково обґрунтованих віртуальних реконструкцій історичних об'єктів з високим рівнем візуальної достовірності та інтерактивності.

Отримані результати засвідчують доцільність і ефективність використання віртуальної реальності як інструменту дослідження, презентації та збереження архітектурної спадщини, поєднуючи наукову обґрунтованість із сучасними технологічними можливостями. Виконана робота підтверджує, що грамотно побудований виробничий і технічний підхід дозволяє досягти балансу між візуальною якістю, продуктивністю та зручністю користування, відкриваючи перспективи подальшого розвитку VR-реконструкцій у професійній архітектурній, освітній та культурній практиці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. HTF Market Intelligence. URL: <https://www.htfmarketintelligence.com/report/global-architecture-engineering-and-construction-aec-software-market> (дата звернення: 03.09.2025)
2. Adoption of virtual and augmented reality in the architecture, engineering, construction, and facilities management. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/built-environment/articles/10.3389/fbuil.2025.1580639/full> (дата звернення: 03.09.2025)
3. Virtual Reality In Architecture: The Innovative Future of Immersive Design. URL: <https://retheme.com/virtual-reality-in-architecture/> (дата звернення: 03.09.2025)
4. Virtual Reality Market Forecast. URL: <https://www.nextmsc.com/report/virtual-reality-market> (дата звернення: 03.09.2025)
5. Zaha Hadid Architects Explores AI-Driven Design at “Architecture of Possibility” Exhibition in Shenzhen. URL: <https://www.archdaily.com/1037409/zaha-hadid-architects-explores-ai-driven-design-at-architecture-of-possibility-exhibition-in-shenzhen-china> (дата звернення: 03.09.2025)
6. Exhibition explores transformative work of ZHA. URL: https://www.eyeshenzhen.com/content/2025-12/16/content_31820451.htm (дата звернення: 03.09.2025)
7. UNStudio and Bjarke Ingels Group Invest in New Virtual Space. URL: https://www.architectmagazine.com/technology/unstudio-and-bjarke-ingels-group-invest-in-new-virtual-space_o (дата звернення: 03.09.2025)
8. BIG and UNStudio launch augmented reality design software. URL: <https://www.archpaper.com/2019/06/hyperform-augmented-reality-design-software-bjarke-ingels-group-big-unstudio/> (дата звернення: 03.09.2025)
9. Virtual Reality (VR) Market (2023 - 2030). URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/virtual-reality-vr-market> (дата звернення: 03.09.2025)
10. Towards digital architecture, engineering, and construction (AEC) industry through virtual design and construction (VDC) and digital twin. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266612332100060X> (дата звернення: 03.09.2025)
11. Discover the Trends Shaping the AEC Industry in 2025 and Beyond. URL:

<https://www.vectorworks.net/en-US/newsroom/aec-trends-2025-report> (дата звернення: 03.09.2025)

12. Virtual Reality (VR) Market Size, Share, Growth, and Industry Analysis. URL: <https://www.businessresearchinsights.com/market-reports/virtual-reality-vr-market-122548> (дата звернення: 07.09.2025)

13. Evolution and research trends in virtual reality and augmented reality technologies for the architecture, engineering, and construction (AEC) industry. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/virtual-reality/articles/10.3389/frvir.2025.1725875/full> (дата звернення: 07.09.2025)

14. Insight on 3D Virtual Reconstruction of Architectural and Archaeological Cultural Heritage. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00393630.2025.2529089> (дата звернення: 07.09.2025)

15. The London Charter and its Applicability. URL: https://www.researchgate.net/publication/272621806_The_London_Charter_and_its_Applicability (дата звернення: 07.09.2025)

16. International Guidelines for Virtual Archaeology: The Seville Principles. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-01784-6_16 (дата звернення: 07.09.2025)

17. Principles of Seville. URL: <https://icomos.es/wp-content/uploads/2020/06/Seville-Principles-IN-ES-FR.pdf> (дата звернення: 07.09.2025)

18. Virtual reality as a tool to enhance the efficiency and reliability of the virtual reconstruction process for heritage/archaeological sites. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212054824000109> (дата звернення: 07.09.2025)

19. Working Experiences with the Reconstruction Argumentation Method. URL: https://www.chnt.at/wp-content/uploads/eBook_CHNT23_Grellert.pdf (дата звернення: 07.09.2025)

20. Implementing Best Practice in Cultural Heritage Visualisation: The London Charter. URL: https://www.researchgate.net/publication/299668875_Implementing_Best_Practice_in_Cultural_Heritage_Visualisation_The_London_Charter (дата звернення: 07.09.2025)

21. Automatic Virtual Reconstruction of Historic Buildings Through Deep Learning. A Critical Analysis of a Paradigm Shift. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-36155-5_26 (дата звернення: 07.09.2025)

22. From One Picture to Lost Play: Reviving Ancient Games with Artificial Intelligence for Digital Heritage Conservation. URL: <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLVIII-M-9-2025/361/2025/> (дата звернення: 09.09.2025)
23. Three-dimensional perception in virtual reality: size estimation using spatial cues. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s43995-025-00237-7> (дата звернення: 09.09.2025)
24. The Perception of Space in Virtual Reality, Correlation Between Affordances and Spatial Presence. URL: <https://doaj.org/article/b8ad2b86c870408b91d3f786ffa0e1a2> (дата звернення: 09.09.2025)
25. Perceiving distance in virtual reality: theoretical insights from contemporary technologies. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9745869/> (дата звернення: 09.09.2025)
26. Cortical correlate of spatial presence in 2D and 3D interactive virtual reality: an EEG study. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22206906/> (дата звернення: 09.09.2025)
27. The effect of perspective on presence and space perception. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24223156/> (дата звернення: 09.09.2025)
28. Assessment of Spatial Presence Experiences and Symptoms of Cybersickness in Dynamic and Static Virtual Environments. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40565946/> (дата звернення: 11.09.2025)
29. The Fidelity-based Presence Scale (FPS): Modeling the Effects of Fidelity on Sense of Presence. URL: <https://arxiv.org/abs/2504.04355> (дата звернення: 11.09.2025)
30. Preserving Ukraine's Heritage with the Leica BLK360: Collaborative 3D Documentation Amidst Conflict. URL: <https://shop.leica-geosystems.com/at/de-DE/leica-blk/blk360/blog/preserving-heritage-leica-blk360-3d-documentation> (дата звернення: 11.09.2025)
31. Ukrainians are Protecting Cultural Heritage in 3D. URL: <https://blog.lidarnews.com/ukrainians-are-protecting-cultural-heritage-in-3d/> (дата звернення: 11.09.2025)
32. Activists using 3D scanning in new initiative to archive Ukrainian heritage sites. URL: <https://3dprintingindustry.com/news/activists-using-3d-scanning-in-new-initiative-to-archive-ukrainian-heritage-sites-before-russia-destroys-them-211005/> (дата звернення: 11.09.2025)
33. Ukraine is racing to 3D scan its monuments in case they're bombed in the war and need restoration. URL: <https://www.euronews.com/next/2023/01/22/ukraine-is-racing-to-3d-scan-its->

monuments-in-case-theyre-bombed-in-the-war-and-need-resto (дата звернення: 11.09.2025)

34. Crowd-sourcing the 3D Digital Reconstructions of Lost Cultural Heritage. URL: https://www.researchgate.net/publication/291328390_Crowd-sourcing_the_3D_Digital_Reconstructions_of_Lost_Cultural_Heritage (дата звернення: 20.09.2025)

35. Crowdsourcing the Reconstruction of Lost Heritage. URL: <https://www.gim-international.com/content/article/crowdsourcing-the-reconstruction-of-lost-heritage> (дата звернення: 20.09.2025)

36. Engaging institutions in crowdsourcing close-range photogrammetry models of urban cultural heritage. URL: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/jchmsd-07-2022-0107/full/html> (дата звернення: 20.09.2025)

37. Historic Preservation through Hi-Def Documentation. URL: <https://cyark.org/about/historic-preservation-through-hidef-documentation> (дата звернення: 20.09.2025)

38. The power of 3D: CyArk's journey in preserving cultural heritage. URL: <https://www.gim-international.com/content/article/the-power-of-3d-cyark-s-journey-in-preserving-cultural-heritage> (дата звернення: 20.09.2025)

39. Over 100,000 Cultural Heritage 3D Models on Sketchfab. URL: <https://sketchfab.com/blogs/community/over-100000-cultural-heritage-3d-models-on-sketchfab/> (дата звернення: 20.09.2025)

40. Cultural Heritage Spotlight: Global Digital Heritage. URL: <https://sketchfab.com/blogs/community/cultural-heritage-spotlight-global-digital-heritage/> (дата звернення: 23.09.2025)

41. 3D Data Long-Term Preservation in Cultural Heritage. URL: <https://arxiv.org/abs/2409.04507> (дата звернення: 23.09.2025)

42. Cultural Heritage Digital Preservation: Safeguarding History in the Digital Age. URL: <https://maarcofrancis.com/leadership-values/cultural-heritage-digital-preservation-3d-scanning/> (дата звернення: 23.09.2025)

43. 3D Data Practices and Preservation for Humanities. URL: <https://www.mdpi.com/2571-9408/8/10/435> (дата звернення: 23.09.2025)

44. Zoo CAD Engine Overview. URL: <https://zoo.dev/research/zoo-cad-engine-overview> (дата звернення: 23.09.2025)

45. Mesh Files vs. CAD Files: What's The Difference? URL: <https://www.myeng.ca/blog/mesh-files-vs-cad-files-whats-the-difference> (дата звернення: 23.09.2025)

46. 3D Mesh Modeling vs. Engineering CAD Modeling: Key Differences and Best Software. URL: <https://wiya3d.com/3d-mesh-modeling-vs-engineering-cad-modeling/> (дата звернення: 23.09.2025)
47. The Core Challenge: Bridging the Fidelity Gap in the CAD to Game Engine Workflow. URL: <https://88cars3d.com/2025/12/01/the-core-challenge-bridging-the-fidelity-gap-in-the-cad-to-game-engine-workflow/> (дата звернення: 23.09.2025)
48. VR-READY App. URL: <https://apps.autodesk.com/RVT/en/Detail/Index?id=293813844256407121> (дата звернення: 27.09.2025)
49. The Difference Between 3D CAD and Low-Poly Models via Retopology. URL: <https://www.missoun.com/resources/differences-between-3d-cad-models-and-low-poly-models-with-retopology> (дата звернення: 27.09.2025)
50. Integration of CAD Models into Game Engines. URL: <https://www.scitepress.org/Papers/2021/102017/102017.pdf> (дата звернення: 27.09.2025)
51. From CAD programs to game engine. URL: <https://polycount.com/discussion/237390/from-cad-programs-to-game-engine> (дата звернення: 27.09.2025)
52. Exploring the Impact of Virtual Reality in Architectural Rendering. URL: <https://www.easyrender.com/a/exploring-the-impact-of-virtual-reality-in-architectural-rendering> (дата звернення: 27.09.2025)
53. Application of virtual reality in architecture. URL: <https://www.academicblock.com/technology/virtual-reality/vr-architectural-visualization> (дата звернення: 27.09.2025)
54. Why Quality 3D Modeling for VR Is the Foundation of Effective Training. URL: <https://3d-ace.com/blog/3d-modeling-for-vr-training/> (дата звернення: 02.10.2025)
55. How to optimize 3D CAD models for maximum performance? URL: <https://www.gamearter.com/blog/cad-models-optimization-automatization> (дата звернення: 02.10.2025)
56. The Future of Architectural Rendering: Key Trends Shaping 2025. URL: <https://www.cylind.com/articles/architectural-rendering-trends> (дата звернення: 02.10.2025)
57. Why Real-Time Rendering Technology Matters for Architectural Visualization? URL: <https://mapsystemsindia.com/blog/real-time-rendering-for-architectural-visualization.html> (дата звернення: 02.10.2025)

58. Полігональне 3D-моделювання: робочі процеси Common Box i Edge Modeling. URL: <https://revolta.com.ua/didzhytal/poligonalne-3d-modelyuvannya-robochi-protsesi-common-box-i-edge-modeling.html> (дата звернення: 02.10.2025)
59. Retopology. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Retopology> (дата звернення: 02.10.2025)
60. Automatic 3D Reconstruction: Mesh Extraction Based on Gaussian Splatting from Romanesque–Mudéjar Churches. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/15/8379> (дата звернення: 02.10.2025)
61. Automated Retopology for 3D Assets. URL: <https://blog.datameister.ai/ai-automated-retopology> (дата звернення: 02.10.2025)
62. Порівняльний аналіз технології трасування променів і растеризації. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/32428> (дата звернення: 02.10.2025)
63. How Ray Tracing Hardware Revolutionized Real-Time Graphics. URL: <https://sciencearray.com/computers/ray-tracing-hardware-revolution-real-time-graphics> (дата звернення: 02.10.2025)
64. GeForce RTX for Virtual Reality. URL: <https://www.nvidia.com/en-us/geforce/technologies/vr/> (дата звернення: 02.10.2025)
65. "Eternal Notre-Dame": the immersive experience at the heart of its reconstruction. URL: <https://www.orange.com/en/eternal-notre-dame> (дата звернення: 02.10.2025)
66. Virtual Reality Tours of Notre-Dame. URL: <https://francerevisited.com/2025/04/paris-virtual-reality-tours-notre-dame-eiffel-tower-louvre/> (дата звернення: 02.10.2025)
67. A virtual tour revives the history of Notre-Dame in Paris. URL: <https://www.autodesk.com/design-make/articles/notre-dame-virtual-tour> (дата звернення: 02.10.2025)
68. Notre-Dame Immersive. URL: <https://ars.electronica.art/futurelab/en/projects-notre-dame-immersive/> (дата звернення: 02.10.2025)
69. Damaged cultural sites in Ukraine verified by UNESCO. URL: <https://www.unesco.org/en/articles/damaged-cultural-sites-ukraine-verified-unesco> (дата звернення: 02.10.2025)
70. Destruction of cultural heritage in Ukraine. URL: <https://www.coe.int/en/web/congress/-/destruction-of-cultural-heritage-in-ukraine> (дата звернення: 02.10.2025)
71. Europa Nostra strongly supports the establishment. URL: <https://www.europanostra.org/europa-nostra-strongly-supports-the-establishment>

ent-of-the-ukraine-heritage-fund-in-response-to-the-ongoing-destruction-of-cultural-heritage-in-ukraine/ (дата звернення: 11.10.2025)

72. Development and Validation of Virtual Reality Scenarios to Improve Disability Awareness among Museum Employees. URL: <https://www.mdpi.com/2673-7272/4/3/33> (дата звернення: 11.10.2025)

73. Breaking the barriers: Extended reality and innovative technologies for enhanced accessibility of the Ceramics Museum of Cutrofiano. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212054825000025> (дата звернення: 11.10.2025)

74. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212054825000736> (дата звернення: 11.10.2025)

75. Museums for All innovative practices in accessibility and inclusion. URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000394944> (дата звернення: 11.10.2025)

76. Кишенькова країна. URL: <https://skeiron.com.ua/projects/63> (дата звернення: 20.10.2025)

77. Museum of Fine Art of Precarpathians. URL: <https://sketchfab.com/3d-models/museum-of-fine-art-of-precarpathians-fca48428795f4fb59e782ca7f349cb65> (дата звернення: 20.10.2025)

78. Pocket City AR: Lviv. URL: <https://skeiron.com.ua/projects/81> (дата звернення: 20.10.2025)

79. «Голос» архітектури у VR: у Лаврі представили проєкт «Україна в мініатюрі». URL: <https://mcsc.gov.ua/news/golos-arhitektury-u-vr-u-lavri-predstavyly-proyekt-u-krayina-v-miniatury/> (дата звернення: 20.10.2025)

80. Ukrainian cultural heritage published in 3D on Europeana.eu for the first time. URL: <https://pro.europeana.eu/post/ukrainian-cultural-heritage-published-in-3d-on-europeana-eu-for-the-first-time> (дата звернення: 20.10.2025)

81. Цифрова відбудова: як за допомогою технологій врятувати українські музеї. URL: <https://sil.media/p/tsifrova-vidbudova-iaak-za-dopomogoiu-tekhnologii-vriatuvati-ukrayinski-muzei-847064-1399> (дата звернення: 20.10.2025)

82. Перша VR-виставка про війну в Україні. URL: <https://war.city/uk/> (дата звернення: 20.10.2025)

83. Ukrainian Experience of VR-reconstruction of Historical and Cultural Heritage Objects. URL: https://www.researchgate.net/publication/347978179_Ukrainian_Experience_of_VR-reconstruction_of_Historical_and_Cultural_Heritage_Objects (дата звернення: 20.10.2025)

84. Blender vs 3ds Max: Which 3D Software is Right for Your Project?. URL: <https://vagon.io/blog/blender-vs-3ds-max> (дата звернення: 29.10.2025)

85. Which 3D Modeling Software Should You Choose. URL: <https://medium.com/@irenderofficial/which-3d-modeling-software-should-you-choose-in-2026-blender-or-3ds-max-2b0ce3acce3e> (дата звернення: 29.10.2025)

86. Blender 3D vs 3ds Max. URL: <https://www.selecthub.com/3d-design-software/blender-3d-vs-3ds-max/> (дата звернення: 29.10.2025)

87. Blender vs 3ds Max: Which 3D Modeling Software Should You Choose in 2025? URL: <https://irendering.net/blender-vs-3ds-max-which-3d-modeling-software-should-you-choose-in-2025/> (дата звернення: 29.10.2025)

88. Blender or 3DS max: Which is the Best for Archviz in 2025? URL: <https://www.cgarchitect.com/features/articles/c685e73c-blender-or-3ds-max-which-is-the-best-for-archviz-in-2025> (дата звернення: 29.10.2025)

89. Best 3D Modeling Software for Architecture in 2025: Studio-Tested. URL: <https://4dviz.com/blog/best-3d-modeling-software-for-architecture-in-2025/> (дата звернення: 29.10.2025)

90. Physically Based Materials. URL: <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/physically-based-materials-in-unreal-engine> (дата звернення: 29.10.2025)

91. Unreal Engine 5 Launches in Early Access with New VR Template Built on OpenXR. URL: <https://www.roadtovr.com/unreal-engine-5-vr-template-openxr-lumen-nanite-support/> (дата звернення: 29.10.2025)

92. Long Beach Aviation History. URL: <https://www.longbeach.gov/lgb/about-us/airport-history/> (дата звернення: 29.10.2025)

93. ArchiCAD. URL: <https://support.hegias.com/en/article/archicad-w6apsm/> (дата звернення: 29.10.2025)

94. Import-Export » FBX. URL: https://docs.blender.org/manual/uk/2.81/addons/import_export/io_scene_fbx.html (дата звернення: 29.10.2025)

95. Pico 4 Ultra VS Meta Quest 3: the battle of the best mid-range VR headsets. URL: <https://www.techradar.com/computing/virtual-reality-augmented-reality/pico-4>

-ultra-vs-meta-quest-3-the-battle-of-the-best-mid-range-vr-headsets (дата звернення: 29.10.2025)

96. URL:

<https://rebusfarm.net/blog/texel-density-basics-every-artist-should-know> (дата звернення: 29.10.2025)

97. Texel Density Basics Every Artist Should Know. URL:

<https://rebusfarm.net/blog/texel-density-basics-every-artist-should-know> (дата звернення: 02.11.2025)

98. How to create texture atlases properly. URL:

<https://forums.unrealengine.com/t/how-to-create-texture-atlases-properly/2512060> (дата звернення: 02.11.2025)

99. Felyx's Guide to Trim Sheets. URL: <https://www.artstation.com/blogs/jennifermcgarry/yd4Q/jenns-guide-to-trim-sheets> (дата звернення:

02.11.2025)

100. ЗАКОН УКРАЇНИ Про охорону праці. URL:

<https://zakon.rada.gov.ua/go/2694-12> (дата звернення: 05.12.2025)

101. Virtual Reality: Using Standards to Address Potential Dangers.

URL:

<https://ulse.org/insight/ul-standards-engagement-standards-matter-virtual-reality-using-standards-address-potential-dangers/> (дата звернення: 02.11.2025)

102. VR Risks for Kids: Essential Safety Guide for Parents 2025.

URL:

<https://www.jetlearn.com/blog/vr-risks-for-kids-essential-safety-guide-for-parents-2025> (дата звернення: 02.11.2025)

103. Virtual Reality Health & Safety Usage Guide. URL:

<https://www.classvr.com/health-safety/> (дата звернення: 02.11.2025)

104. Virtual Reality (VR) Health & Safety Warnings. URL:

<https://us.alcatel-mobile.com/accessibility-compliance/health-safety-warnings/> (дата звернення: 02.11.2025)

105. Meta Quest 2 Health & Safety. URL:

https://researchguides.waketech.edu/virtual_reality/metaquest2_safety (дата звернення: 02.11.2025)

106. Fundamental Design Guidelines for Developing Inclusive Virtual Reality Experiences. URL:

<https://moldstud.com/articles/p-fundamental-design-guidelines-for-developing-inclusive-virtual-reality-experiences-that-ensure-accessibility-for-every-user>

(дата звернення: 02.11.2025)

107. Exclusion Rates among Disabled and Older Users of Virtual and Augmented Reality. URL:

<https://dl.acm.org/doi/10.1145/3706598.3713377>

(дата звернення: 05.11.2025)

108. Inclusive Immersion: a review of efforts to improve accessibility

in

virtual

reality.

URL:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10055-023-00850-8> (дата звернення: 05.11.2025)

109. Making VR and XR Inclusive: Key Accessibility Features and Uses. URL: <https://virtualspeech.com/blog/vr-accessibility-inclusion> (дата звернення: 05.11.2025)

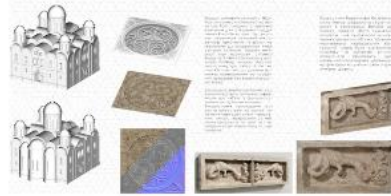
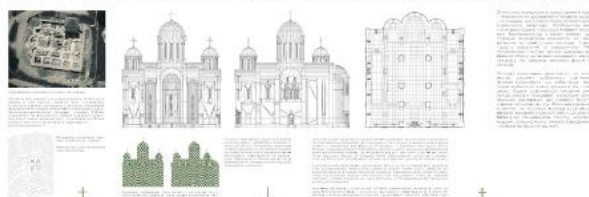
110. Inclusive education beyond formal settings: AR and VR as accessibility strategies for deaf and hard-of-hearing individuals. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/education/articles/10.3389/feduc.2025.1715885/full> (дата звернення: 05.11.2025)

111. Inclusive Augmented and Virtual Reality: A Research Agenda. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10447318.2023.2247614> (дата звернення: 05.11.2025)

112. Designing accessible museum experiences in virtual reality for individuals with Autism Spectrum Disorder. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212054825000736> (дата звернення: 05.11.2025)

ДОДАТКИ

АЛГОРИТМИ СТВОРЕННЯ ІА МЕТОДИ АНАЛІЗУ АРХІТЕКТУРНИХ ОБ'ЄКТІВ У ВІРТУАЛЬНІЙ РЕАЛЬНОСТІ



ПЛАГІАТ



Звіт подібності

Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

Кваліфікаційна робота

Автор

Сопилюк А.

Науковий керівник / Експерт

ІД документу

333265024

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

King Danylo University

підрозділ

King Danylo University

ЗВІТ

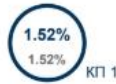
Дата звіту

2/11/2026

Дата редагування

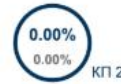
Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



25

Довжина фрази для коефіцієнта подібності 2



16595

Кількість слів

131448

Кількість символів