

**МІНІСТЕРСТВО ФІНАНСІВ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ПОДАТКОВИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ФАКУЛЬТЕТ ФІНАНСІВ ТА ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ І  
СИСТЕМ**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**на тему: Розробка 3D-конструктора козацької сторожової вежі**

Здобувача вищої освіти першого (бакалаврського) рівня,  
IV курсу, групи ЦДБ-22-1, спеціальності 122 «Комп'ютерні науки»,  
освітня програма «Технології цифрового дизайну»



Степанук Крістини Віталіївни

(прізвище, ім'я, по батькові)

Науковий керівник



(підпис)

Ратушняк Тетяна Володимирівна,  
канд. фіз.-мат. наук, доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь,  
вчене звання)

Керівник  
освітньо-професійної  
програми



(підпис)

Ратушняк Тетяна Володимирівна  
канд. фіз.-мат. наук, доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь,  
вчене звання)

Допущено до захисту за рішенням кафедри комп'ютерних та інформаційних  
технологій і систем протокол від «12» травня 2026 №20

Завідувач кафедри



(підпис)

Філоненко Михайло  
Миколайович, канд. фіз.-мат.  
наук, доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь,  
вчене звання)

Ірпінь – 2026

Реєстрація № 53

28.05.2026

(дата)



(підпис відповідальної особи)

Результати перевірки

до захисту  
(до захисту, на доопрацювання)

12.05.26

(дата)



(підпис)

Результат захисту

4 (добре)  
(оцінка)

12.06.2026

(дата)



(підпис)

Голова комісії:



(підпис)

О.С. Дюбанов

Члени комісії:



(підпис)

М.М. Філоненко



(підпис)

Т.В. Ратушняк



(підпис)

В.О. Ніжегородцев

## БЛАНК ОЦІНЮВАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

| Об'єкти контролю                                                                                                                                                               | Діапазон оцінки в балах | Фактична кількість балів | Примітки | Дата, П.І.Б.: керівника, голови комісії членів комісії, секретаря, (підписи)                                                                                                                                                                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ОЦІНЮВАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ КОМІСІЄЮ ПО ЗАХИСТУ</b>                                                                                                                   |                         |                          |          |                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 1. Зміст випускної роботи (якість теоретичного матеріалу, його зв'язок з практичним, вміння представляти матеріал в логічній послідовності, наявність висновків та пропозицій) | від 0 до 30             | 25                       |          | 12.06.2016<br>Ратушняк Т.В. <i>Т.В. Ратушняк</i><br>Дюбанов О.С. <i>О.С. Дюбанов</i><br>Філоненко М.М. <i>М.М. Філоненко</i><br>Ратушняк Т.В. <i>Т.В. Ратушняк</i><br>Ніжегородцев В.О. <i>В.О. Ніжегородцев</i><br>Суховерхівка Л.П. <i>Л.П. Суховерхівка</i> |
| 2. Дотримання вимог щодо оформлення                                                                                                                                            | від 0 до 10             | 8                        |          |                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 3. Вчасне виконання роботи на всіх етапах у встановлені кафедрою терміни                                                                                                       | від 0 до 5              | 4                        |          |                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 4. Рецензент                                                                                                                                                                   | від 0 до 5              | 4                        |          |                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>РАЗОМ БАЛІВ</b>                                                                                                                                                             | від 0 до 50             | 41                       |          |                                                                                                                                                                                                                                                                |

Оцінювання кваліфікаційної роботи науковим керівником – 44 балів.

### ПЕРЕВЕДЕННЯ ОЦІНКИ ЗА 100-БАЛЬНОЮ ШКАЛОЮ ДО НАЦІОНАЛЬНОЇ ШКАЛИ ТА ШКАЛИ ЄКТС

| Оцінка за 100-бальною шкалою | Оцінка за шкалою ЄКТС | Оцінка за національною шкалою | Дата       | П.І.Б.: голови, членів комісії, секретаря, (підписи)                                                                                                                                                       |
|------------------------------|-----------------------|-------------------------------|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 85                           | B                     | 4 (добре)                     | 12.06.2016 | Дюбанов О.С. <i>О.С. Дюбанов</i><br>Філоненко М.М. <i>М.М. Філоненко</i><br>Ратушняк Т.В. <i>Т.В. Ратушняк</i><br>Ніжегородцев В.О. <i>В.О. Ніжегородцев</i><br>Суховерхівка Л.П. <i>Л.П. Суховерхівка</i> |

### ПРАВИЛА ПЕРЕВЕДЕННЯ ОЦІНОК ДО НАЦІОНАЛЬНОЇ ШКАЛИ ТА ШКАЛИ ЄКТС

| Оцінка за 100-бальною шкалою | Оцінка за шкалою ЄКТС | Оцінка за національною шкалою |
|------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| 90-100                       | A                     | 5 (відмінно)                  |
| 80-89                        | B                     | 4 (добре)                     |
| 70-79                        | C                     |                               |
| 60-69                        | D                     |                               |
| 50-59                        | E                     | 3 (задовільно)                |
| 35-49                        | FX                    | 2 (незадовільно)              |

Факультет фінансів та цифрових технологій  
Кафедра комп'ютерних та інформаційних технологій і систем  
Галузь знань: 12 «Інформаційні технології»  
Спеціальність: 122 «Комп'ютерні науки»  
Освітня програма: «Технології цифрового дизайну»

Затверджую  
Завідувач кафедри  Філоненко М.М.  
«01» грудня 2025

Завдання на кваліфікаційну роботу  
здобувачу вищої освіти  
Степанюк Крістіні Віталіївні  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Розробка 3D-конструктора козацької сторожової вежі

Затверджена наказом ректора від «28» листопада 2025 № 1526

2. Строк здачі закінченої роботи «11» травня 2026

3. Мета роботи: розробка інформаційної технології, алгоритмічного та програмного забезпечення для інтерактивного 3D-конструктора козацької сторожової вежі, що забезпечує автоматизоване параметричне керування геометричними об'єктами, генерацію тривимірних сцен за заданими правилами та оптимізацію моделей для подальшої фізичної репродукції.

Об'єкт дослідження: процеси автоматизованого проєктування, процедурної генерації та параметричного моделювання тривимірних об'єктів складної просторової структури.

Предмет дослідження: методи, алгоритми та програмні засоби для створення інтерактивних параметричних 3D-конструкторів, побудови користувацьких інтерфейсів та оптимізації геометричних даних для адитивного виробництва.

Орієнтовна база дослідження: наукові праці з комп'ютерної графіки, обчислювальної геометрії, процедурної генерації контенту, методів параметричного моделювання та систем автоматизованого проєктування; середовище тривимірного моделювання SketchUp; спеціалізоване програмне забезпечення для адитивного виробництва; апаратні засоби тривимірного друку.

4. Вихідні дані до роботи: історико-архітектурні параметри козацьких веж (лінійні розміри, конструкція ярусів та автентичні типи кріплень); технологічні обмеження адитивного виробництва (параметри 3D-принтера, фізична усадка матеріалу для розрахунку допусків у пазах та вимоги слайсерів до форматів експорту 3D-геометрії).

5. Перелік графічного матеріалу: скріншоти 3D-конструктора козацької сторожової вежі у середовищі SketchUp.

6. Зміст кваліфікаційної роботи (перелік питань за кожним розділом):

Вступ; Розділ 1. Теоретичні основи та аналіз предметної області: Історико-архітектурні особливості козацьких сторожових веж, Огляд сучасних технологій 3D-моделювання та візуалізації, Порівняльний аналіз існуючих програмних рішень для створення 3D-конструкторів;

Розділ 2. Системний аналіз та архітектурне проектування 3d-конструктора: Вимоги до функціональності 3D-конструктора, Архітектура проекту та структура компонентів вежі, Алгоритми побудови параметричних елементів конструктора; Розділ 3. Розробка 3D-конструктора козацької сторожової вежі та підготовка до фізичної репродукції: Створення 3D-моделі козацької вежі у середовищі SketchUp, Структура та матеріальна палітра конструктора, Особливості побудови основних елементів вежі, Налаштування інтерфейсу конструктора та параметрів моделі, Тестування та апробація розробленого конструктора, Кріпильні з'єднання деталей фізичного конструктора, Підготовка моделі до 3D-друку у середовищі CrealityPrint; Висновки; Список використаних джерел; Додатки.

#### 7. Календарний план виконання роботи

| №<br>п/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи                                                                                                                                                                  | Строк виконання етапів роботи |               |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------|
|          |                                                                                                                                                                                                      | За<br>планом                  | Фактично      |
| 1        | 2                                                                                                                                                                                                    | 3                             | 4             |
| 1        | Вибір теми, підбір літературних джерел, формування структури кваліфікаційної роботи                                                                                                                  | До 30.10.2025                 | До 30.10.2025 |
| 2        | <b>I розділ</b> (розкрити сутність і стан дослідження наукової проблематики роботи, після чого навести її загальну характеристику; огляд літератури за темою і вибір конкретних напрямів досліджень) | 29.12.2025                    | 29.12.2025    |
| 3        | <b>II розділ</b> (аналіз експериментальної частини про методики досліджень)                                                                                                                          | 23.02.2026                    | 23.02.2026    |
| 4        | <b>III розділ</b> (проведені теоретичні і (або) експериментальні дослідження та проектні рішення)                                                                                                    | 20.04.2026                    | 20.04.2026    |
| 5        | <b>Висновки</b>                                                                                                                                                                                      | 04.05.2026                    | 04.05.2026    |
| 6        | Доопрацювання роботи з урахуванням зауважень наукового керівника                                                                                                                                     | 11.05.2026                    | 11.05.2026    |
| 7        | Отримання відгуку керівника                                                                                                                                                                          | 01.05.2026                    | 01.05.2026    |
| 8        | Отримання зовнішньої рецензії                                                                                                                                                                        | 04.06.2026                    | 04.06.2026    |

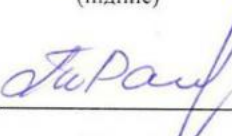
8. Дата видачі завдання «01» грудня 2025

9. Керівник кваліфікаційної роботи

  
(підпис)

Ратушняк Т.В.  
(прізвище, ініціали)

10. Керівник освітньо-професійної програми

  
(підпис)

Ратушняк Т.В.  
(прізвище, ініціали)

11. Завдання до виконання отримав  
здобувач вищої освіти

  
(підпис)

Степанюк К.В.  
(прізвище, ініціали)

## АНОТАЦІЯ

### Розробка 3D-конструктора козацької сторожової вежі

*Мета роботи:* розробка інформаційної технології, алгоритмічного та програмного забезпечення для інтерактивного 3D-конструктора козацької сторожової вежі, що забезпечує автоматизоване параметричне керування геометричними об'єктами, генерацію тривимірних сцен за заданими правилами та оптимізацію моделей для подальшої фізичної репродукції (3D-друку).

*Завданням роботи є:* проаналізувати історико-архітектурні особливості об'єктів моделювання з метою їх формалізації та декомпозиції на базові геометричні примітиви й параметричні класи; здійснити порівняльний аналіз сучасних технологій, рушіїв та програмних інтерфейсів (API) 3D-моделювання за критеріями обчислювальної складності та можливостей процедурної генерації; розробити математичне забезпечення та алгоритми параметричного варіювання архітектурних елементів, обчислення просторових координат вузлів з'єднання та динамічного перерахунку геометрії сцени; реалізувати архітектурні компоненти у середовищі SketchUp та розробити програмні скрипти/модулі керування параметризацією (наприклад, з використанням SketchUp Ruby API або динамічних компонентів), а також оптимізувати користувацький інтерфейс; обґрунтувати вибір структур даних для представлення 3D-моделей та алгоритмів конвертації для коректного експорту геометрії (у форматі STL/OBJ) з метою безпомилкового слайсингу та 3D-друку; провести тестування системи та апробацію 3D-моделі.

*Об'єкт дослідження:* процеси автоматизованого проектування, процедурної генерації та параметричного моделювання тривимірних об'єктів складної просторової структури.

*Предмет дослідження:* моделі, методи, алгоритми та програмні засоби для створення інтерактивних параметричних 3D-конструкторів, побудови користувацьких інтерфейсів та оптимізації геометричних даних для адитивного виробництва.

*Методи дослідження:* аналіз науково-технічної літератури та архівних матеріалів, порівняльний аналіз програмних засобів, методи параметричного моделювання, об'єктно-орієнтоване проєктування, тестування програмного забезпечення.

*Базою дослідження* виступають науково-методичні праці з комп'ютерної графіки, обчислювальної геометрії, процедурної генерації контенту, методів параметричного моделювання та систем автоматизованого проєктування; середовище тривимірного моделювання SketchUp; спеціалізоване програмне забезпечення для адитивного виробництва CrealityPrint; апаратні засоби тривимірного друку Creality..

*Одержані результати можуть бути використані* у навчальному процесі для ілюстрації принципів архітектурного моделювання, у науково-дослідних проєктах із цифрового збереження культурної спадщини, а також як демонстраційний матеріал у музейній та туристичній діяльності.

*Кваліфікаційна робота містить* 51 сторінку, 4 рисунки, 2 таблиці, список використаних джерел із 44 найменувань, 1 додаток.

*Ключові слова:* 3D-конструктор, параметричне моделювання, процедурна генерація, алгоритмізація, архітектура програмного забезпечення, Sketchup, динамічні компоненти, адитивне виробництво, 3D-друк, слайсинг, козацька сторожова вежа.

*Рік виконання кваліфікаційної роботи:* 2026.

*Рік захисту роботи:* 2026.

## **ABSTRACT**

### Development of a 3D Constructor for a Cossack Watchtower

The objective of the thesis: development of the information technology, algorithmic, and software tools for an interactive 3D constructor of a Cossack watchtower, which provides automated parametric control of geometric objects, generation of three-dimensional scenes based on predefined rules, and optimization of models for subsequent physical reproduction (3D printing).

The tasks of the thesis are: to analyze the historical and architectural features of the modeling objects for the purpose of their formalization and decomposition into basic geometric primitives and parametric classes; to perform a comparative analysis of modern 3D modeling technologies, engines, and application programming interfaces (APIs) based on the criteria of computational complexity and procedural generation capabilities; to develop the mathematical foundation and algorithms for the parametric variation of architectural elements, computation of spatial coordinates of joint nodes, and dynamic recalculation of scene geometry; to implement architectural components within the SketchUp environment and develop software scripts/modules for parameterization control (e.g., using the SketchUp Ruby API or dynamic components), as well as to optimize the user interface; to justify the choice of data structures for 3D model representation and conversion algorithms for correct geometry export (into STL/OBJ formats) to ensure error-free slicing and 3D printing; to conduct system testing and verification of the 3D model.

Object of research: processes of computer-aided design, procedural generation, and parametric modeling of three-dimensional objects with complex spatial structures.

Subject of research: models, methods, algorithms, and software tools for creating interactive parametric 3D constructors, building user interfaces, and optimizing geometric data for additive manufacturing.

Research methods: analysis of scientific and technical literature and archival materials, comparative analysis of software tools, parametric modeling methods, object-oriented design, and software testing.

The research framework includes: scientific and methodological works on computer graphics, computational geometry, procedural content generation, parametric modeling methods, and computer-aided design (CAD) systems; the SketchUp three-dimensional modeling environment; specialized software for additive manufacturing (CrealtyPrint); and Creality 3D printing hardware.

The results obtained can be utilized in the educational process to illustrate the principles of architectural modeling, in research projects dedicated to the digital preservation of cultural heritage, and as demonstration materials in museum and tourism activities.

The thesis consists of 51 pages, 4 figures, 2 tables, and a list of references containing 44 sources, and 1 appendix..

Keywords: 3D constructor, parametric modeling, procedural generation, algorithmization, software architecture, SketchUp, dynamic components, additive manufacturing, 3D printing, slicing, Cossack watchtower.

Year of thesis completion: 2026.

Year of thesis defense: 2026.

## ЗМІСТ

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ                                                             | 3  |
| ВСТУП                                                                                              | 5  |
| РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ                                           | 8  |
| 1.1. Історико-архітектурні особливості козацьких сторожових веж                                    | 8  |
| 1.2. Огляд сучасних технологій 3D-моделювання та візуалізації                                      | 10 |
| 1.3. Порівняльний аналіз існуючих програмних рішень для створення 3D-конструкторів                 | 12 |
| РОЗДІЛ 2. СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА АРХІТЕКТУРНЕ ПРОЄКТУВАННЯ 3D-КОНСТРУКТОРА                            | 15 |
| 2.1. Вимоги до функціональності 3D-конструктора                                                    | 15 |
| 2.2. Архітектура проєкту та структура компонентів вежі                                             | 17 |
| 2.3. Алгоритми побудови параметричних елементів конструктора                                       | 18 |
| РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА 3D-КОНСТРУКТОРА КОЗАЦЬКОЇ СТОРОЖОВОЇ ВЕЖІ ТА ПІДГОТОВКА ДО ФІЗИЧНОЇ РЕПРОДУКЦІЇ | 21 |
| 3.1. Створення 3D-моделі козацької вежі у середовищі SketchUp                                      | 21 |
| 3.2. Структура та матеріальна палітра конструктора                                                 | 25 |
| 3.3. Особливості побудови основних елементів вежі                                                  | 29 |
| 3.4. Налаштування інтерфейсу конструктора та параметрів моделі                                     | 32 |
| 3.5. Тестування та апробація розробленого конструктора                                             | 34 |
| 3.6. Кріпильні з'єднання деталей фізичного конструктора                                            | 37 |
| 3.7. Підготовка моделі до 3D-друку у середовищі CrealityPrint                                      | 39 |
| Висновки до розділу 3                                                                              | 42 |
| ВИСНОВКИ                                                                                           | 44 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ                                                                         | 48 |
| ДОДАТОК                                                                                            | 52 |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

3D - тривимірний (Three-Dimensional)

ABS - акрилонітрил-бутадієн-стирол (Acrylonitrile Butadiene Styrene), пластик для 3D-друку

API - інтерфейс прикладного програмування (Application Programming Interface)

AR - доповнена реальність (Augmented Reality)

BIM - інформаційне моделювання будівель (Building Information Modeling)

CAD - комп'ютерне проєктування (Computer-Aided Design)

CSG - конструктивна суцільна геометрія (Constructive Solid Geometry)

DLP - цифрова обробка світла, технологія 3D-друку (Digital Light Processing)

FDM - моделювання методом наплавлення (Fused Deposition Modeling)

FFF - виготовлення методом плавленої філаментної екструзії (Fused Filament Fabrication)

G-code - мова програмування для систем числового програмного керування

GPU - графічний процесор (Graphics Processing Unit)

GUI - графічний інтерфейс користувача (Graphical User Interface)

LOD - рівень деталізації (Level of Detail)

NURBS - неоднорідні раціональні B-сплайни (Non-Uniform Rational B-Splines)

OBJ - формат файлів тривимірних об'єктів (Wavefront OBJ)

PBR - фізично коректний рендеринг (Physically Based Rendering)

PETG - поліетилентерефталат гліколь-модифікований, пластик для 3D-друку

PLA - полілактид (Polylactic Acid), біорозкладний пластик для 3D-друку

SDK - набір засобів розробки (Software Development Kit)

SLA - стереолітографія (Stereolithography), технологія фотополімерного 3D-друку

SketchUp - програмне забезпечення для тривимірного моделювання

STL - формат файлів для 3D-друку (Stereolithography)

TPU - термопластичний поліуретан (Thermoplastic Polyurethane), гнучкий пластик

UV-розгортка - метод накладання текстур на 3D-поверхні

VR - віртуальна реальність (Virtual Reality)

XML - розширювана мова розмітки (eXtensible Markup Language)

ДПУ - Державний податковий університет

ДСТУ - Державний стандарт України

КР - кваліфікаційна робота

ОПП - освітньо-професійна програма

ПЗ - програмне забезпечення

ПК - персональний комп'ютер

СЛС - селективне лазерне спікання (Selective Laser Sintering, SLS)

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Збереження та популяризація культурно-історичної спадщини України є одним з ключових завдань сучасного суспільства, особливо в умовах активного розвитку цифрових технологій. Козацька доба залишила після себе значний архітектурний спадок, зокрема мережу сторожових веж, які відігравали критичну роль в обороноздатності українських земель у XVI-XVIII століттях. Проте більшість цих об'єктів нині перебуває в занедбаному або зруйнованому стані, що унеможливорює їх безпосереднє дослідження та демонстрацію широкій аудиторії.

Тривимірне моделювання відкриває принципово нові можливості для відтворення архітектурних пам'яток у цифровому просторі. Розробка інтерактивного 3D-конструктора козацької сторожової вежі дає змогу не лише зафіксувати типові архітектурні форми та конструктивні особливості оборонних споруд козацької доби, а й зробити цю інформацію доступною для студентів, викладачів, дослідників і всіх зацікавлених. Використання програми SketchUp як базової платформи обумовлено її широкими можливостями параметричного моделювання, підтримкою розширень та відносно низьким порогом входу для користувачів.

*Мета роботи* - розробка інформаційної технології, алгоритмічного та програмного забезпечення для інтерактивного 3D-конструктора козацької сторожової вежі, що забезпечує автоматизоване параметричне керування геометричними об'єктами, генерацію тривимірних сцен за заданими правилами та оптимізацію моделей для подальшої фізичної репродукції (3D-друку).

*Завдання дослідження:*

- проаналізувати історико-архітектурні особливості об'єктів моделювання з метою їх формалізації та декомпозиції на базові геометричні примітиви й параметричні класи;

- здійснити порівняльний аналіз сучасних технологій, рушіїв та програмних інтерфейсів (API) 3D-моделювання за критеріями обчислювальної складності та можливостей процедурної генерації;
- розробити математичне забезпечення та алгоритми параметричного варіювання архітектурних елементів, обчислення просторових координат вузлів з'єднання та динамічного перерахунку геометрії сцени;
- реалізувати архітектурні компоненти у середовищі SketchUp та розробити програмні скрипти/модулі керування параметризацією (наприклад, з використанням SketchUp Ruby API або динамічних компонентів), а також оптимізувати користувацький інтерфейс;
- обґрунтувати вибір структур даних для представлення 3D-моделей та алгоритмів конвертації для коректного експорту геометрії (у форматі STL/OBJ) з метою безпомилкового слайсингу та 3D-друку;
- провести тестування системи та апробацію 3D-моделі.

*Об'єкт дослідження* - процеси автоматизованого проєктування, процедурної генерації та параметричного моделювання тривимірних об'єктів складної просторової структури.

*Предмет дослідження* - моделі, методи, алгоритми та програмні засоби для створення інтерактивних параметричних 3D-конструкторів, побудови користувацьких інтерфейсів та оптимізації геометричних даних для адитивного виробництва.

*Методи дослідження:* аналіз науково-технічної літератури та архівних матеріалів, порівняльний аналіз програмних засобів, методи параметричного моделювання, об'єктно-орієнтоване проєктування, тестування програмного забезпечення.

*База дослідження:* наукові праці з комп'ютерної графіки, обчислювальної геометрії, процедурної генерації контенту, методів параметричного моделювання та систем автоматизованого проєктування; середовище тривимірного моделювання SketchUp; спеціалізоване програмне забезпечення

для адитивного виробництва CrealtyPrint; апаратні засоби тривимірного друку Crealty.

*Апробація результатів роботи:* Основні результати дослідження було апробовано на IV Міжнародній науково-практичній конференції «Інновації та перспективні шляхи розвитку інформаційних технологій», де вони отримали позитивне обговорення та були враховані у подальшій науковій роботі [43].

Практична значимість результатів: розроблений 3D-конструктор козацької сторожової вежі може використовуватися у навчальному процесі для ілюстрації принципів архітектурного моделювання, у науково-дослідних проєктах із цифрового збереження культурної спадщини, а також як демонстраційний матеріал у музейній та туристичній діяльності.

*Структура роботи:* кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг основного тексту – 51 сторінка, 4 рисунки, 2 таблиці, список джерел містить 44 найменування додаток.

## РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

### 1.1. Історико-архітектурні особливості козацьких сторожових веж

Козацька доба (кінець XV - кінець XVIII ст.) залишила значний слід в архітектурі України, зокрема у розбудові фортифікаційних споруд. Сторожові вежі козаків були невід'ємним елементом оборонної системи Запорозької Січі та прикордонних ліній захисту від набігів кримських татар і турецьких військ [1]. Ці споруди виконували дозорну, сигнальну та частково оборонну функції, відрізняючись від класичних фортечних веж відносно невеликими розмірами та специфічними конструктивними рішеннями.

Типова козацька сторожова вежа являла собою вертикальну споруду висотою від 10 до 20 метрів, збудовану переважно з дерева (зруб) або каменю (на Правобережжі та Поділлі). Дерев'яні вежі зводили зі стовбурів дуба або сосни, тоді як кам'яні споруди частіше зустрічаються у прикордонних містах і замках [2]. Конструктивно вежа складалася з кількох ярусів: підземного або напідземного фундаменту, нижнього оборонного поверху, середніх ярусів спостереження та верхнього дозорного майданчика з зубцями або парапетом [3].

Дослідники виокремлюють декілька регіональних типів козацьких сторожових веж. Перший тип - вежі Лівобережної України - характеризується переважним використанням дерева, квадратним або восьмикутним перетином, відносно простим завершенням. Другий тип - вежі Поділля та Правобережжя - зводився частіше з каменю або цегли, мав складніші архітектурні форми із рисами ренесансу чи барокко, що свідчить про вплив польсько-литовської архітектурної традиції [4]. Третій тип - вежі Слобідської України - поєднував ознаки двох попередніх типів і відображав специфіку порубіжного регіону.

Конструктивна специфіка козацьких веж обумовлена насамперед функціональними вимогами. Оскільки основне призначення споруди полягало у спостереженні за навколишньою місцевістю, вертикальний розвиток становив головний принцип побудови. Важливим елементом була наявність зубців (мерлонів) на верхньому майданчику, які слугували захистом для вартових під

час обстрілу. Бійниці - вузькі вертикальні отвори в стінах - дозволяли вести стрільбу, залишаючись прикритими від ворожих стріл [5].

Матеріалознавчий аспект є принципово важливим для розуміння особливостей козацького фортифікаційного будівництва. Дерев'яні вежі зводилися методом зрубної кладки, де горизонтальні вінці з колод або брусів утворювали стінові конструкції. Система з'єднання колод «в обло» (з залишком кінців) або «в лапу» (без залишку) суттєво впливала на міцність споруди [6]. Для кам'яних веж використовували вапняк, пісковик або, в пізніший період, випалену цеглу. Товщина стін у нижній частині могла досягати 1,5-2 метрів, поступово зменшуючись до верху.

Як приклад збережених козацьких сторожових веж можна навести вежу Костянтина Острозького у Меджибожі, Кам'янець-Подільську фортецю з комплексом веж різних епох, а також часткові залишки веж на Хортиці [7]. Ці пам'ятки є важливим джерелом відомостей про архітектурні норми козацького оборонного будівництва. Разом з тим значна частина дерев'яних козацьких веж не дійшла до наших часів через природне руйнування деревини, пожежі та війни, що суттєво ускладнює дослідження.

У контексті цифрового збереження культурної спадщини велике значення набувають методи фотограмметрії та лазерного сканування, що дозволяють фіксувати обмірні дані збережених споруд [8]. Результати таких обмірів стають вихідними даними для подальшого тривимірного моделювання. Окрім того, значний масив інформації міститься в архівних кресленнях, описах та ілюстраціях XVI-XIX століть, зберігаються у фондах Національної бібліотеки України ім. В. І. Вернадського, Центральному державному історичному архіві та регіональних архівосховищах [9].

Для розробки параметричного 3D-конструктора принципово важливим є виокремлення типових архітектурних елементів та їх атрибутів. На основі аналізу наукової літератури й архівних матеріалів до базових елементів козацької сторожової вежі можна віднести: фундамент (підземна частина), цоколь (підвищення над рівнем землі), основний об'єм (стовбур вежі), яруси-площадки,

систему бійниць, зубці (мерлони) верхнього майданчика, дах або зовнішній парапет [10]. Кожен із цих елементів характеризується певними параметрами: висотою, шириною, кутом нахилу, матеріалом. Саме ця параметрична природа визначає можливість автоматизованого варіювання геометрії вежі за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення.

Важливим аспектом є також семіотичний вимір козацьких веж - їх місце в культурній пам'яті. Дослідники наголошують, що вежа як вертикальна домінанта в ландшафті несе в собі потужний символічний посил: вона уособлює стійкість, силу та чуйність спільноти до загроз [11]. Цей образ активно використовується у сучасній українській культурі, геральдиці та мистецтві, що лише підкреслює актуальність збереження й реконструкції подібних архітектурних об'єктів засобами сучасних цифрових технологій.

## **1.2. Огляд сучасних технологій 3D-моделювання та візуалізації**

Тривимірне моделювання (3D-моделювання) є одним із ключових інструментів сучасної комп'ютерної графіки, архітектурного проєктування та збереження культурної спадщини [12]. В основі 3D-моделювання лежить процес створення математичного представлення об'єкта у тривимірному просторі, яке може бути відрендерено у вигляді двовимірних зображень або використано для інтерактивних застосунків. Залежно від підходу до побудови геометрії розрізняють кілька основних технологій: полігональне моделювання, NURBS-моделювання, сабдивізне моделювання, процедурне (параметричне) моделювання та методи на основі воксельних сіток.

Полігональне моделювання є найбільш поширеним підходом у комп'ютерній графіці. Об'єкти представляються як сукупність плоских багатокутників (здебільшого трикутників або чотирикутників), що утворюють замкнену поверхню - полігональну сітку (mesh) [13]. Перевагою методу є простота маніпуляцій з геометрією та широка підтримка в більшості програм рендерингу та ігрових рушіїв. Обмеженням - складність відтворення плавних органічних форм без значного збільшення кількості полігонів. Для архітектурної

візуалізації, де переважають прямолінійні форми, полігональне моделювання є оптимальним вибором.

NURBS-моделювання (Non-Uniform Rational B-Splines) базується на математичному представленні кривих та поверхонь через контрольні точки. Цей метод широко застосовується у CAD-системах для промислового проектування, де необхідна точна геометрія з мінімальним набором даних [14]. Для архітектурного моделювання козацьких веж NURBS-підхід може бути корисним при відтворенні аркових елементів та округлих деталей.

Процедурне (параметричне) моделювання є особливо актуальним для розробки конструкторів та генеративних систем. Замість безпосереднього редагування геометрії, параметричний підхід оперує набором правил та параметрів, за якими геометрія генерується автоматично [15]. Наприклад, якщо задати висоту вежі, кількість ярусів та матеріал стін як параметри, система автоматично побудує відповідну геометричну модель. Такий підхід є основою для таких інструментів, як Grasshopper (розширення для Rhinoceros), Dynamo (розширення для Revit) та вбудовані параметричні функції SketchUp.

Окремо слід відзначити технологію BIM (Building Information Modeling), яка виходить за межі суто геометричного моделювання і охоплює семантичну інформацію про будівлю - матеріали, конструктивні системи, функціональні характеристики [16]. Для реконструкції архітектурних пам'яток BIM-підхід дозволяє не лише відтворити зовнішній вигляд споруди, а й сформувати повноцінну базу знань про її конструктив та матеріальний склад.

Сучасні технології візуалізації суттєво розширюють можливості представлення тривимірних моделей. Фотореалістичний рендеринг на основі фізично коректного освітлення (PBR - Physically Based Rendering) дозволяє отримати зображення, практично невідрізнені від фотографій реальних об'єктів [17]. Для козацьких веж це відкриває можливість відтворити фактуру кам'яного або дерев'яного матеріалу з максимальною достовірністю. Серед популярних рендер-рушіїв виокремлюються V-Ray, Corona Renderer, Lumion і Enscape.

Технології доповненої реальності (AR) та віртуальної реальності (VR) надають нові форми взаємодії з тривимірними моделями [18]. У контексті збереження культурної спадщини ці технології дозволяють розмістити цифровий аналог козацької вежі безпосередньо на місці її колишнього розташування (AR) або надати користувачеві можливість «пройтися» по відтвореній фортифікаційній споруді зсередини (VR). Ряд вітчизняних та міжнародних проєктів вже використовує ці підходи для популяризації культурної спадщини.

Важливим напрямом є технологія фотограмметрії, що дозволяє отримати тривимірну модель реального об'єкта на основі серії фотографій [19]. Програми типу Agisoft Metashape або RealityCapture автоматично будують точкові хмари та текстуровані сітки на основі фотограмметричних даних. Для козацьких веж, що збереглися, цей метод є найбільш достовірним способом цифрової документації.

У контексті навчальних застосунків і інтерактивних конструкторів особливе місце займають ігрові рушії - Unity та Unreal Engine. Вони забезпечують потужну платформу для розробки інтерактивних застосунків із тривимірним контентом, підтримують широкий спектр форматів імпорту 3D-моделей та надають інструменти для програмування логіки взаємодії [20].

### **1.3. Порівняльний аналіз існуючих програмних рішень для створення 3D-конструкторів**

На сучасному ринку програмного забезпечення представлено широкий спектр інструментів, які можуть використовуватися для розробки параметричних 3D-конструкторів. Їх порівняльний аналіз є необхідним кроком для обґрунтування вибору SketchUp як основної платформи проєкту [21].

Autodesk AutoCAD та Autodesk Revit є індустріальними стандартами у сфері архітектурного проєктування. AutoCAD орієнтований на двовимірне та тривимірне технічне креслення, тоді як Revit спеціально розроблений для BIM-моделювання. Revit підтримує параметричне моделювання через механізм «сімей» (Families) та розширення Dynamo для параметричної автоматизації [22].

Однак висока вартість ліцензій, складний інтерфейс і орієнтованість на промислове застосування роблять ці інструменти менш підходящими для навчальних і науково-популярних проєктів.

Blender є потужним безкоштовним програмним забезпеченням з відкритим кодом для тривимірного моделювання, анімації та рендерингу [23]. Вбудований інструмент Geometry Nodes забезпечує широкі можливості для процедурного моделювання. Головними перевагами Blender є відсутність вартості ліцензії та велика спільнота користувачів. До обмежень слід віднести відносно складний інтерфейс для початківців і відсутність вбудованих інструментів для роботи з BIM-даними.

Rhinoceros 3D (Rhino) у поєднанні з розширенням Grasshopper є де-факто стандартом для параметричного та генеративного моделювання у архітектурному середовищі [24]. Grasshopper реалізує візуальне програмування на основі вузлів (node-based), що дозволяє будувати складні параметричні алгоритми без знання традиційних мов програмування. Однак висока вартість та орієнтованість на спеціалізованих архітекторів звужують сферу застосування.

Trimble SketchUp займає особливу нішу на ринку 3D-інструментів завдяки поєднанню потужних можливостей моделювання з відносно простим і інтуїтивним інтерфейсом [25]. Програма дозволяє будувати архітектурні моделі безпосередньо у тривимірному просторі, використовуючи набір базових інструментів (Push/Pull, Follow Me, Scale). Механізм Dynamic Components є вбудованим інструментом параметризації, що дозволяє задавати атрибути компонентів (розміри, матеріали, положення), створювати залежності між параметрами через формульні вирази та організовувати інтерактивне масштабування і трансформацію елементів [26]. SketchUp Extension Warehouse містить тисячі безкоштовних і комерційних розширень, що суттєво розширюють функціонал базової версії.

Порівняльний аналіз програмних засобів за ключовими критеріями наведено у вигляді узагальнення: SketchUp поступається Blender та Rhino у можливостях параметричного моделювання, але значно перевершує їх за

простотою освоєння та швидкістю створення архітектурних форм. Для задачі розробки навчального 3D-конструктора козацької вежі SketchUp є оптимальним вибором, оскільки: а) програма широко використовується у навчальних закладах; б) безкоштовна версія (SketchUp Free) забезпечує базовий функціонал; в) механізм Dynamic Components достатній для реалізації параметричного конструктора; г) широка підтримка форматів експорту забезпечує сумісність з іншими системами [27].

Слід також відзначити існуючі проєкти з цифрової реконструкції козацьких фортифікацій. Проєкт «Цифрова Хортиця» (розроблений в рамках співпраці ЮНЕСКО та Українського інституту), а також низка студентських та дипломних проєктів, виконаних у вітчизняних університетах, засвідчують зростаючий інтерес до тематики [28]. Проте жоден з відомих проєктів не пропонує інтерактивний параметричний конструктор, що дозволяв би кінцевому користувачеві самостійно варіювати архітектурні елементи вежі - саме цей аспект є новизною розробки, представленої у даній кваліфікаційній роботі.

### **Висновки до розділу 1**

У першому розділі виконано комплексний аналіз предметної області. Встановлено, що козацькі сторожові вежі є самобутньою категорією фортифікаційних споруд із характерними конструктивними та архітектурними особливостями, що визначають набір типових параметризованих елементів для конструктора. Проведено огляд сучасних технологій 3D-моделювання, включаючи полігональне, параметричне моделювання та BIM-підхід. На основі порівняльного аналізу програмних засобів обґрунтовано вибір SketchUp як платформи для реалізації 3D-конструктора козацької сторожової вежі.

## РОЗДІЛ 2. СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА АРХІТЕКТУРНЕ ПРОЄКТУВАННЯ 3D-КОНСТРУКТОРА

### 2.1. Вимоги до функціональності 3D-конструктора

Розробка будь-якого програмного або інформаційного продукту розпочинається з формулювання вимог. Відповідно до методології системного аналізу вимоги поділяються на функціональні (що описують поведінку системи) та нефункціональні (що характеризують якісні атрибути системи) [29]. Для 3D-конструктора козацької сторожової вежі вимоги формувалися на основі аналізу предметної області (розділ 1), вивчення аналогів та інтерв'ювання потенційних користувачів (студентів і викладачів ДПУ).

До основних функціональних вимог відносяться наступні. По-перше, конструктор повинен забезпечувати наявність параметризованих 3D-компонентів усіх ключових елементів вежі: фундаменту, цоколю, ярусів основного об'єму, бійниць, зубців (мерлонів) і завершення (дах або парапет). По-друге, система має підтримувати варіювання геометричних параметрів: висоти кожного ярусу (від 2 до 5 м), ширини стін (від 0,5 до 2 м), кількості зубців (від 4 до 16), розмірів бійниць. По-третє, конструктор повинен надавати можливість вибору матеріалу (дерево, камінь, цегла) з автоматичним накладанням відповідної текстури. По-четверте, система має надавати попередній перегляд змін у реальному часі при зміні параметрів [30].

Нефункціональні вимоги включають такі аспекти. Щодо продуктивності: модель з максимальним рівнем деталізації не повинна перевищувати 500 000 полігонів задля забезпечення прийнятної швидкості рендерингу на типовому навчальному комп'ютері. Щодо сумісності: фінальна модель має бути доступна для експорту у форматах SKP (SketchUp), OBJ та STL для можливості подальшого використання в інших системах. Щодо зручності використання: інтерфейс конструктора має бути зрозумілим без спеціальної підготовки, документація - доступною українською мовою. Щодо надійності: при

некоректних вхідних значеннях параметрів система має видавати зрозуміле повідомлення про помилку, не допускаючи збою [31].

Для систематизації вимог використано метод Use Case (варіантів використання). Виокремлено три категорії акторів: студент (використовує конструктор в навчальних цілях), дослідник (використовує для наукової реконструкції), педагог (використовує для підготовки демонстраційних матеріалів). Для кожного актора визначено відповідні сценарії використання.

Студент як базовий актор виконує такі варіанти використання: запустити конструктор, обрати тип вежі (дерев'яна або кам'яна), встановити параметри окремих елементів через діалоговий інтерфейс, переглянути модель у тривимірному просторі, зберегти результат. Дослідник додатково потребує можливості завантаження архівних даних як референсу для налаштування параметрів та експорту моделі у форматі для подальшого наукового аналізу. Педагог використовує конструктор для підготовки демонстраційних матеріалів, фіксуючи декілька варіантів конструкції та зберігаючи їх для порівняння [32].

Аналіз функціональних вимог дозволяє сформулювати ключові атрибути компонентів конструктора у вигляді параметричної специфікації. Кожен компонент характеризується: ідентифікатором (унікальна назва), типом геометрії (куб, циліндр, арка тощо), набором числових параметрів (висота, ширина, глибина), прив'язкою матеріалу (назва текстури), залежностями від інших компонентів (наприклад, розміщення бійниць залежить від висоти ярусу) [33].

Окремою вимогою є забезпечення масштабованості конструктора: архітектура системи має дозволяти додавання нових компонентів без суттєвого переписування базового коду. Це реалізується через прийнятий шаблон проєктування - компонентний підхід SketchUp, де кожен архітектурний елемент є незалежним компонентом із власними атрибутами [34].

## 2.2. Архітектура проєкту та структура компонентів вежі

Архітектура 3D-конструктора козацької сторожової вежі базується на ієрархічній структурі компонентів SketchUp. Відповідно до специфіки програми, кожен компонент є іменованим об'єктом, що може містити вкладені підкомпоненти, власну геометрію та набір атрибутів у механізмі Dynamic Components [35]. Такий підхід природно відповідає ієрархічній природі архітектурного об'єкта: вежа складається з ярусів, яруси - з елементів стін, стіни - з бійниць та зубців.

Верхній рівень ієрархії представлений компонентом «Вежа» (TowerAssembly), що є кореневим об'єктом і контейнером для всіх підкомпонентів. На цьому рівні зберігаються глобальні параметри: загальна висота вежі, матеріальна схема (дерево/камінь/цегла), кількість ярусів. Другий рівень ієрархії - компоненти «Ярус» (TowerLevel\_N), де N - порядковий номер ярусу знизу вгору. Кожен ярус характеризується власною висотою та шириною. Третій рівень - елементи кожного ярусу: «Стіна» (Wall), «Бійниця» (Loophole), «Арка» (Arch) тощо [36].

Механізм Dynamic Components реалізується через систему атрибутів, що зберігаються у спеціальній таблиці компонента. Атрибут може бути числовим (float), рядковим (string) або булевим (boolean). Формульні вирази в атрибутах дозволяють задавати залежності: наприклад, атрибут «висота ярусу» може бути виражений як функція від загальної висоти вежі та кількості ярусів. SketchUp обчислює ці залежності при кожній зміні параметра та автоматично оновлює геометрію [37].

Структура компонентів вежі включає наступні групи. Перша група - фундаментні елементи: прямокутна основа зі скошеними гранями (Footing), цоколь (Plinth). Друга група - елементи основного об'єму: стіна прямолінійна (WallStraight), стіна кутова (WallCorner), перекриття ярусу (FloorSlab). Третя група - декоративно-функціональні елементи: вертикальна бійниця (LoopholeVertical), хрестоподібна бійниця (LoopholeCross), арковий отвір (ArchOpening). Четверта група - елементи завершення: зубець-мерлон (Merlon),

парапетна плита (ParapetSlab), дах двосхилий (RoofGabled), дах шатровий (RoofHipped) [38].

Параметрична залежність між компонентами будується за принципом «від загального до часткового». Зміна глобального параметра «кількість ярусів» автоматично додає або видаляє компоненти «Ярус» з ієрархії та перераховує висоту кожного ярусу відповідно до заданої загальної висоти. Зміна параметра «ширина вежі» пропорційно масштабує всі горизонтальні розміри компонентів. Цей принцип забезпечує когерентність моделі при будь-яких змінах параметрів.

Важливим архітектурним рішенням є підтримка двох режимів роботи конструктора. Перший режим - «типова вежа» - надає готовий набір параметрів, що відповідають типовому прикладу козацької сторожової вежі (умовна висота 15 м, 3 яруси, дерев'яний матеріал). Другий режим - «власний проєкт» - надає повний доступ до всіх параметрів для кастомізації [39]. Такий підхід забезпечує низький поріг входу для нових користувачів, водночас надаючи достатню гнучкість для досвідчених.

### 2.3. Алгоритми побудови параметричних елементів конструктора

Алгоритмічна реалізація параметричних елементів конструктора є технічним ядром системи. У SketchUp параметрична поведінка Dynamic Components задається через внутрішню мову виразів (expression language), що підтримує арифметичні операції, умовні вирази (IF, CHOOSE) та тригонометричні функції [40]. Для складніших алгоритмів використовується Ruby API - вбудований інтерпретатор мови програмування Ruby, що надає доступ до повного API SketchUp для генерації та маніпуляції геометрією.

Алгоритм побудови основного об'єму вежі реалізовано наступним чином. Вхідні параметри: ширина основи (BaseWidth), загальна висота (TotalHeight), кількість ярусів (NumLevels), коефіцієнт звуження (TaperRatio). На першому кроці обчислюється висота кожного ярусу:  $\text{LevelHeight} = \text{TotalHeight} / \text{NumLevels}$ . На другому кроці для кожного ярусу N обчислюється ширина:

$\text{LevelWidth}(N) = \text{BaseWidth} * (1 - \text{TaperRatio} * N / \text{NumLevels})$ . На третьому кроці кожен ярус будується як витягнений прямокутний профіль за допомогою операції Push/Pull на задану висоту LevelHeight. Результат - плавно звужена до верху квадратна призма, що відповідає типовому виду козацької вежі.

Алгоритм розміщення бійниць враховує геометрію конкретного ярусу. Для ярусу з шириною  $W$  та висотою  $H$  задається кількість бійниць  $N\_loop$  та розмір бійниці ( $\text{width}_1 \times \text{height}_1$ ). Позиції бійниць по периметру: кожна стіна периметру має рівномірно розподілені бійниці з кроком  $W / (N\_loop\_per\_wall + 1)$ . Алгоритм перевіряє мінімальну відстань між бійницями (не менше  $2 \times \text{width}_1$ ) та мінімальну відстань від краю стіни (не менше  $0.5 \times \text{width}_1$ ). При порушенні умов виводиться попередження і кількість бійниць автоматично коригується [41].

Алгоритм генерації зубців (мерлонів) є одним з ключових з точки зору візуальної ідентичності козацької вежі. Вхідні параметри: периметр верхньої площадки  $P$ , кількість зубців  $N\_m$ , ширина зубця  $W\_m$ , висота зубця  $H\_m$ . Крок зубців визначається як  $\text{Step} = P / (N\_m * 2)$ . Зубці розміщуються по периметру з чергуванням:  $W\_m$  ширини зубця, потім  $\text{Step} - W\_m$  прогалини. Ruby-скрипт ітеративно будує кожен зубець як окремий компонент типу «Merlon» та розміщує його у відповідну позицію. Такий підхід дозволяє при зміні параметра  $N\_m$  автоматично перебудувати всю систему зубців.

Алгоритм накладання текстур реалізований через систему матеріалів SketchUp. Для кожного типу матеріалу (дерево, камінь, цегла) підготовлено набір UV-текстур роздільністю  $1024 \times 1024$  пікселів. При виборі матеріалу скрипт виконує масове перепризначення матеріалів усім компонентам вежі через API: `model.materials[material_name].apply_to_entity(entity)`. Масштаб текстури адаптується до розмірів компонента для збереження природного вигляду поверхні незалежно від обраних розмірів вежі [42].

Для забезпечення коректності моделі при граничних значеннях параметрів реалізовано систему валідації. Перед застосуванням нових значень параметрів скрипт перевіряє: значення кожного числового параметра знаходиться у

допустимому діапазоні, відношення висоти до ширини вежі не перевищує конструктивно обґрунтованого ліміту (10:1), кількість елементів не перевищує порогу продуктивності. При виявленні некоректних значень виводиться діалогове вікно з описом проблеми та рекомендованим допустимим діапазоном.

### **Висновки до розділу 2**

У другому розділі сформульовано функціональні та нефункціональні вимоги до 3D-конструктора козацької сторожової вежі, побудовано ієрархічну структуру компонентів проєкту, розроблено алгоритми побудови ключових параметричних елементів: основного об'єму вежі, бійниць, зубців та системи накладання текстур. Визначено підходи до валідації параметрів та забезпечення коректності моделі.

## **РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА 3D-КОНСТРУКТОРА КОЗАЦЬКОЇ СТОРОЖОВОЇ ВЕЖІ ТА ПІДГОТОВКА ДО ФІЗИЧНОЇ РЕПРОДУКЦІЇ**

### **3.1. Створення 3D-моделі козацької вежі у середовищі SketchUp**

Практична частина дипломної роботи присвячена самостійному ручному моделюванню тривимірної моделі козацької сторожової вежі у графічному редакторі SketchUp. Цей редактор обрано як основне робоче середовище з огляду на наочність геометричних побудов, зрозумілий для початківця набір інструментів, що базується на принципі «накресли контур - надай йому об'єм», а також на можливість збереження готової геометрії у форматі, придатному для подальшого тривимірного друку [21, 25]. Уся подальша робота над моделлю виконувалася безпосередньо в браузерній версії редактора, що не потребує встановлення складного програмного забезпечення на робочу станцію і дозволяє повноцінно працювати над проєктом з будь-якого комп'ютера з доступом до мережі.

Принципово важливою рисою застосованого підходу є те, що вся геометрія вежі створена власноруч, крок за кроком, без використання будь-яких засобів автоматизованої побудови. Кожна стіна, кожен віконний проріз, кожна колода частоколу були накреслені й видавлені вручну за допомогою стандартного інструментарію редактора. Такий спосіб моделювання, хоч і потребує більших затрат часу порівняно з автоматизованими методами, забезпечує повний контроль над пропорціями та дрібними деталями, дає змогу відстежувати точність кожного з'єднання та формує цілісне розуміння внутрішньої будови споруди - що є особливо цінним у межах підготовки фахівця спеціальності «Технології цифрового дизайну».

Перед безпосереднім моделюванням сформовано ескізний задум майбутньої споруди, що спирається на історико-архітектурний аналіз реальних козацьких сторожових веж [2, 4] та на проєктні рішення, обґрунтовані в попередніх розділах роботи. Згідно з цим задумом, вежа має складатися з трьох ярусів, які поступово звужуються догори, увінчуватися чотиригранним

пірамідальним дахом з флагштоком, спиратися на пласку кам'янисту основу та бути оточеною захисним частоколом із загострених колод. Визначено орієнтовні пропорції конструкції, після чого ці пропорції відтворювалися в моделі з опорою на точні числові розміри, що вводилися безпосередньо під час побудови.

Основу інструментального арсеналу склали кілька базових інструментів SketchUp. Інструмент «Прямокутник» (Rectangle) застосовувався для накреслення замкнених прямокутних контурів основ ярусів та контурів отворів; інструмент «Лінія» (Line) - для проведення допоміжних ребер, поділу граней на ділянки та з'єднання вузлових точок. Ключову роль відігравав інструмент «Витягування» (Push/Pull), за допомогою якого пласкі контури перетворювалися на об'ємні тіла шляхом видавлювання на точно задану відстань; цей самий інструмент у зворотному русі застосовувався для вдавлювання поверхонь усередину та для прорізання наскрізних отворів. Інструмент «Зміщення» (Offset) використовувався для побудови паралельних внутрішніх контурів, що задавали товщину стін, а інструменти «Переміщення» (Move), «Масштаб» (Scale) та «Поворот» (Rotate) - для подальшого редагування й точного розташування елементів.

Окрему групу склали інструменти, що відповідають за криволінійні форми та оздоблення. Інструмент «Веди мене» (Follow Me) застосовувався там, де потрібно було протягнути обраний профіль уздовж заданої траєкторії - зокрема для формування заокруглених та загострених завершень опорних елементів. Нанесення кольору та фактури деревини виконувалося інструментом «Заливка» (Paint Bucket). Для постійного контролю над виглядом моделі з різних боків застосовувався інструмент «Орбіта» (Orbit), що дозволяє вільно обертати камеру навколо споруди, а для забезпечення точності - інструмент «Рулетка» (Tape Measure), яким відкладалися напрямні лінії та контролювалися відстані між елементами.

Побудову моделі розпочато зі створення основи. Спочатку накреслено плаский контур майданчика у формі багатокутника, наближеного до кола, після чого інструментом «Витягування» цьому контуру надано незначну висоту,

унаслідок чого утворилася тонка дископодібна плита-підмурок. Поверхні плити призначено світло-сірий колір, який імітує кам'янистий насип і візуально відмежовує підмурок від дерев'яної частини споруди. Готова основа стала опорною площиною, відносно якої вирівнювалися всі наступні елементи вежі.

Стіни ярусів зводилися за єдиною повторюваною послідовністю дій. Спершу на основі накреслювався прямокутний контур потрібних розмірів, причому довжина й ширина задавалися не «на око», а введенням точних числових значень із клавіатури. Далі інструментом «Витягування» цей контур піднімався вгору на висоту ярусу, утворюючи суцільний прямокутний блок. Щоб перетворити блок на порожнистий зруб, на його верхній грані інструментом «Зміщення» будувався внутрішній контур, що відступав від зовнішнього на товщину стіни, після чого внутрішня область вдавлювалася вниз - так утворювався відкритий короб зі стінками рівномірної товщини. Цю послідовність повторено для трьох ярусів, кожен з яких має менші габарити за нижчий, завдяки чому споруда набуває характерної форми, що звужується догори.

Перехід між ярусами оформлено невеликим уступом-карнизом, що візуально підкреслює межу між поверхами та надає силуету вежі ступінчастості. Дах змодельовано як правильну чотиригранну піраміду: на квадратній верхній основі за допомогою діагоналей знаходилася центральна точка, від неї вгору відкладалася напрямна на висоту даху, а отриману вершину з'єднано лініями з кутами основи, унаслідок чого утворилися чотири однакові трикутні скати. У вершині піраміди закріплено тонкий вертикальний флагшток, виконаний як невисокий циліндр, на якому розміщено прямокутне прапорне полотнище.

Отвори для вікон та бійниць формувалися наскрізним прорізанням стін. На відповідній грані ярусу спершу накреслювався невеликий прямокутник потрібного розміру та положення, після чого інструментом «Витягування» цей прямокутник вдавлювався вглиб стіни до протилежної поверхні - у момент досягнення задньої грані матеріал у межах контуру повністю видалявся, утворюючи наскрізний проріз. Таким способом виконано прямокутні оглядові

вікна середнього ярусу та вузькі вертикальні бійниці верхнього й нижнього ярусів. Розташування отворів задавалося симетрично відносно осей граней, що забезпечило впорядкований і збалансований вигляд фасадів.

Для збереження цілісності моделі активно застосовувалося групування елементів. Кожен логічно завершений фрагмент - основа, окремих ярус, дах, частокіл - об'єднувався у групу, завдяки чому його геометрія ізолювалася й не «прилипала» до сусідніх поверхонь під час редагування. Повторювані однакові деталі, насамперед загострені колоди частоколу та однотипні бійниці, оформлювалися як компоненти: достатньо було ретельно змодельовати один зразок, перетворити його на компонент і розмножити копіями. Перевага такого підходу полягає в тому, що зміна, внесена в один екземпляр компонента, автоматично відображається на всіх його копіях, що суттєво пришвидшує доопрацювання й гарантує повну однаковість серійних елементів.

Точність побудови забезпечувалася поєднанням кількох прийомів. Інструментом «Рулетка» від країв граней відкладалися напрямні лінії, які слугували орієнтирами для розміщення отворів і деталей; усі ключові розміри вводилися числовими значеннями у полі вимірювань, що виключало похибки приблизного креслення. Активно використовувалися підказки прив'язки редактора - автоматичне визначення кінцевих точок, середин ребер, центрів граней та паралельності напрямків, - завдяки чому елементи стикувалися без зазорів. Переміщення деталей виконувалося із фіксацією напрямку вздовж осей, що дозволяло зміщувати елементи строго по вертикалі чи горизонталі. У результаті яруси вдалося розташувати співвісно один над одним, а частокіл - рівномірно по периметру основи.

Загалом модель будувалася за модульним принципом: споруда від початку проєктувалася як набір окремих самостійних частин, кожна з яких є завершеним об'ємним тілом і може існувати незалежно від інших. Такий підхід було закладено свідомо, з огляду на подальше фізичне відтворення моделі друком, адже він дозволяє виготовляти й опрацьовувати деталі поодиночці, а потім скласти з них цілісну конструкцію. Підсумовуючи, слід наголосити, що описана

тривимірна модель козацької сторожової вежі є результатом послідовної ручної роботи в середовищі SketchUp, виконаної винятково засобами безпосереднього моделювання без застосування автоматизованих чи допоміжних генеративних механізмів.

### **3.2. Структура та матеріальна палітра конструктора**

Готова модель козацької вежі має чітко виражену вертикальну структуру, що складається з кількох послідовно розташованих конструктивних частин. В основі споруди лежить пласка кам'яниста підставка, на якій по периметру встановлено захисний частокіл із загострених колод. Над підставкою здійснюється основний об'єм вежі, утворений трьома ярусами: масивним нижнім ярусом із вхідними воротами, середнім ярусом з оглядовими вікнами та найменшим верхнім ярусом, призначеним для спостереження й оборони. Завершує композицію чотиригранний пірамідальний дах із флагштоком та козацьким прапором. Така будова повністю відповідає історичним прообразам і водночас є зручною з погляду подальшого виготовлення моделі окремими деталями.

Кожна із зазначених частин у проєкті оформлена як самостійна група або компонент, що відображає логіку реальної конструкції. Підставка з частоколом, три яруси, карнизи між ними та дах існують у моделі як відокремлені об'єкти, які можна вибирати, переміщувати, ховати чи показувати незалежно один від одного. Завдяки такому поділу робота над окремою частиною не порушує решти споруди, а загальна структура моделі лишається прозорою та легко керованою навіть за значної кількості дрібних деталей. Повторювані елементи - колоди частоколу, однотипні бійниці, зубці завершень - оформлені компонентами, що гарантує їхню повну геометричну однаковість і дозволяє редагувати весь набір копій через зміну єдиного зразка.

Особливу увагу під час моделювання приділено створенню візуально цілісного образу споруди, що досягається передусім продуманою матеріальною палітрою. Уся видима поверхня моделі вкрита кольорами та фактурами, які імітують природні будівельні матеріали козацької доби - насамперед різні

відтінки деревини, а також камінь основи, метал окуття та тканину прапора. Кольори дерева підбиралися так, щоб передати теплий природний тон деревини й водночас розрізнити окремі частини споруди: нижні яруси отримали темніші, насиченіші відтінки, що асоціюються з міцними породами та з потемнінням деревини від вологи й часу, тоді як верхні яруси виконано у світліших тонах [6]. Така градація надає силуету вежі глибини й підкреслює її ярусну будову.

Нанесення матеріалів виконувалося вручну за допомогою інструмента «Заливка» (Paint Bucket). Потрібний матеріал обирався з бібліотеки матеріалів редактора, після чого послідовно наносився на відповідні грані моделі простим клацанням. Для груп однакових елементів матеріал застосовувався один раз на рівні компонента, завдяки чому всі його копії одразу набували єдиного оформлення. За потреби відтінків матеріалу коригувався у властивостях кольору, що дозволяло точно підлаштувати тон деревини під загальний задум. Послідовне застосування обмеженого, заздалегідь визначеного набору кольорів забезпечило стилістичну єдність моделі та уникнення випадкового різнобою у забарвленні.

Для систематизації застосованих кольорів сформовано матеріальну палітру моделі, що налічує десять основних позицій. Кожному матеріалу відповідає конкретний відтінок, заданий числовими значеннями у колірній моделі RGB, та чітко визначене призначення в межах споруди. Систематизована палітра наведена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

## Матеріальна палітра 3D-моделі козацької сторожової вежі

| Назва відтінку            | Колір                | RGB-значення       | Призначення в моделі      |
|---------------------------|----------------------|--------------------|---------------------------|
| Деревина нижнього ярусу   | Темно-коричневий     | RGB(101, 67, 33)   | Стіни нижнього ярусу      |
| Деревина середнього ярусу | Середньо-коричневий  | RGB(139, 90, 43)   | Стіни середнього ярусу    |
| Деревина верхнього ярусу  | Світло-коричневий    | RGB(160, 110, 60)  | Стіни верхнього ярусу     |
| Деревина частоколу        | Насичений коричневий | RGB(120, 80, 40)   | Загострені колоди огорожі |
| Покриття даху             | Темно-брунатний      | RGB(90, 55, 25)    | Скати пірамідального даху |
| Деревина воріт            | Темний коричневий    | RGB(75, 45, 20)    | Вхідні ворота та двері    |
| Світла деревина           | Світло-золотистий    | RGB(180, 130, 70)  | Балки, опори, карнизи     |
| Камінь основи             | Світло-сірий         | RGB(200, 195, 180) | Підставка-підмурок        |
| Метал окуття              | Темно-сірий          | RGB(60, 60, 65)    | Петлі та залізне окуття   |
| Малинова тканина          | Козацький малиновий  | RGB(165, 30, 35)   | Прапор на флагштоку       |

Диференційований підбір відтінків несе не лише декоративне, а й змістове навантаження. Поступовий перехід кольору деревини від темного внизу до світлого вгорі відтворює реальний принцип спорудження дерев'яних оборонних веж, за яким нижні, найбільш навантажені яруси зводили з твердих і стійких до вологи порід, а легші верхні - з менш щільної деревини [6, 7]. Окремий сірий тон підмурку наочно відділяє кам'янисту основу від дерев'яного зрубу, а яскравий малиновий колір прапора створює виразний композиційний акцент на вершині споруди. Завдяки цьому модель сприймається не як абстрактний об'єм, а як упізнаване відтворення історичної козацької вежі.

Загальний вигляд готової моделі, отриманий безпосередньо в робочому середовищі редактора, представлено на рисунку 3.1. На зображенні добре

помітна трирівнева споруда з пірамідальним дахом і козацьким прапором, оточена захисним частоколом і встановлена на кам'янистій основі. На наступних рисунках наведено окремі частини моделі: верхній ярус із дахом і флагштоком (рисунок 3.2), середній ярус у вигляді відкритого зрубу з віконними прорізами (рисунок 3.3) та нижній ярус, оточений загостреними колодами частоколу (рисунок 3.4).

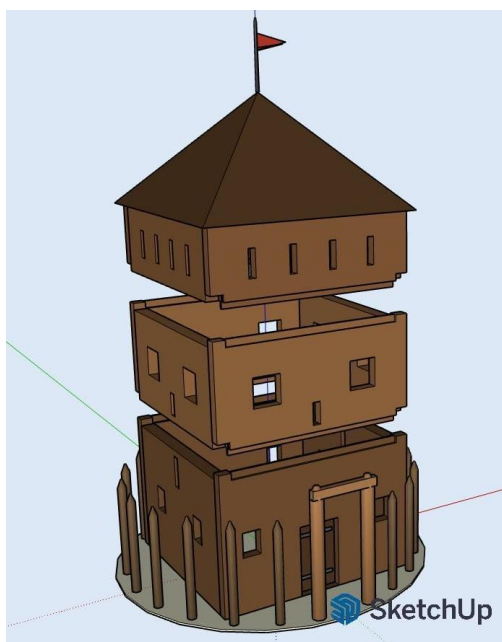


Рис. 3.1 - Загальний вигляд тривимірної моделі козацької сторожової вежі

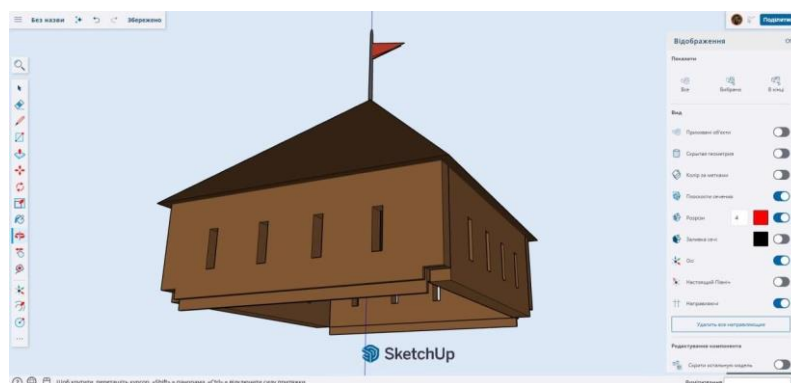


Рис. 3.2 - Верхній ярус споруди з пірамідальним дахом і флагштоком

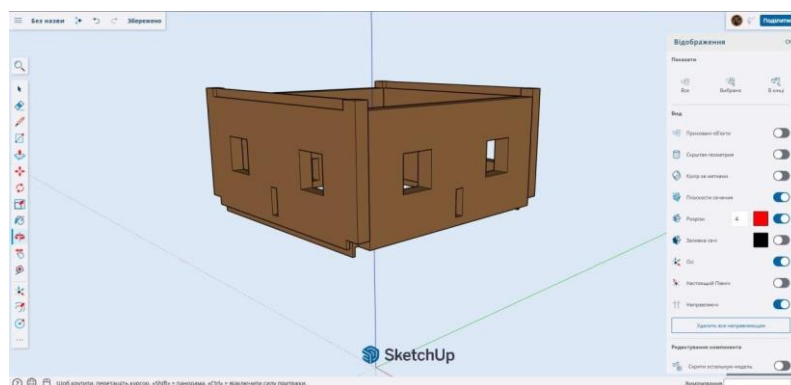


Рис. 3.3 - Середній ярус у вигляді відкритого зрубу з віконними прорізами

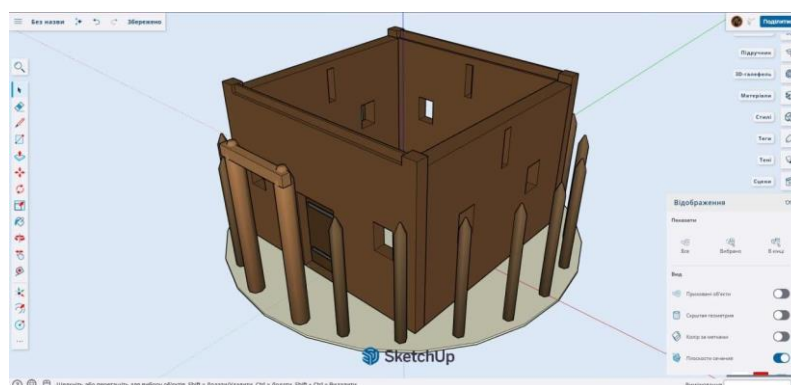


Рис. 3.4 - Нижній ярус, оточений захисним частоколом, на кам'янистій основі

### 3.3. Особливості побудови основних елементів вежі

Стіни ярусів є базовим конструктивним елементом усієї споруди, і саме з них розпочиналося оформлення кожного поверху. Побудова стіни щоразу зводилася до послідовності точних дій: на опорній площині накреслювався прямокутний контур заданих розмірів, після чого інструментом «Витягування» (Push/Pull) контур піднімався на висоту ярусу й перетворювався на суцільний блок. Щоб надати стінам реалістичної товщини й водночас звільнити внутрішній простір, на верхній грані блоку інструментом «Зміщення» (Offset) будувався внутрішній контур, відсунутий усередину на товщину стіни, а обмежена ним площа вдавлювалася вниз тим самим інструментом «Витягування». У підсумку кожен ярус набував вигляду відкритого зверху короба з рівними стінками сталої товщини, що добре видно на зображенні середнього ярусу.

Для забезпечення майбутнього з'єднання деталей між собою у конструкції передбачено пази та відповідні їм виступи. Пази формувалися як невеликі прямокутні заглиблення: на потрібній грані накреслювався контур паза, після

чого він на незначну глибину вдавлювався інструментом «Витягування», утворюючи акуратну виїмку. Виступ-шип, що має входити в такий паз на сусідній деталі, навпаки, видавлювався назовні на відповідну висоту. Розміри пазів і шипів узгоджувалися між собою наперед, щоб у фізичній моделі деталі стикувалися щільно, але без надмірного зусилля. Така продумана геометрія з'єднань закладалася ще на етапі моделювання, що згодом позбавило потреби доопрацьовувати деталі після друку.

Віконні прорізи середнього ярусу створювалися наскрізним прорізанням стіни. На фасадній грані накреслювався прямокутний контур вікна у заздалегідь визначеному положенні, після чого інструментом «Витягування» цей контур вдавлювався вглиб стіни до її внутрішньої поверхні; у момент досягнення протилежної грані матеріал у межах контуру повністю зникав, залишаючи чистий наскрізний отвір. Вікна розташовувалися симетрично на кожному фасаді, що надало ярусу впорядкованого вигляду. Перевірка співвідносінь й однакових розмірів вікон виконувалася за допомогою напрямних ліній, відкладених інструментом «Рулетка».

Бійниці - вузькі вертикальні щілини для спостереження й оборони - будувалися за тим самим принципом наскрізного прорізання, але мали значно меншу ширину порівняно з вікнами. На фасадах нижнього й особливо верхнього ярусів розташовано серії таких вузьких прорізів, рівномірно розподілених по горизонталі. Оскільки бійниці є однотипними повторюваними елементами, одну з них було ретельно змодельовано, перетворено на компонент і розмножено копіями вздовж грані з рівними проміжками. Завдяки цьому всі бійниці отримали ідентичні розміри й форму, а їхнє рівномірне розташування досягалося переміщенням копій на однакову відстань із фіксацією напрямку вздовж осі.

Пірамідальний дах є одним із найскладніших у геометричному відношенні елементів моделі. Його побудова розпочиналася з квадратної основи, що відповідає за розмірами верхньому зрізу найвищого ярусу. Проведенням діагоналей основи знаходився її центр, від якого вертикально вгору інструментом «Рулетка» відкладалася напрямна на висоту даху. Отримана у

такий спосіб вершина з'єднувалася лініями з усіма чотирма кутами основи, унаслідок чого автоматично утворювалися чотири однакові трикутні скати, що сходяться в одній точці. Кут нахилу скатів підбирався таким, щоб дах мав виразний шатровий силует, характерний для козацьких веж [2, 4]. Готовому даху призначався темний брунатний відтінок, що імітує покрівлю з дерев'яної дранки.

Захисний частокіл відтворює характерну для козацьких укріплень огорожу з вертикально вкопаних загострених колод [2]. Окрема колода моделювалася як невисокий вертикальний стовп, верхній кінець якого загострювався: для цього на вершині стовпа сходилися грані, що утворювали конусоподібне вістря. Заокруглення й загострення завершень за потреби формувалося протягуванням профілю інструментом «Веди мене» (Follow Me) уздовж колової траєкторії. Готова колода перетворювалася на компонент і копіювалася по периметру основи з невеликими рівними проміжками між сусідніми стовпами. Розташування колод по колу узгоджувалося з контуром підставки, завдяки чому частокіл рівномірно оточує споруду, як це видно на зображенні нижнього ярусу.

Опорні елементи - кутові стійки, балки та підпори воріт - моделювалися як видовжені прямокутні або циліндричні бруси. Для надання їм об'єму застосовувалося звичайне видавлювання контуру інструментом «Витягування», а для повороту й точного встановлення на місце - інструменти «Поворот» (Rotate) і «Переміщення» (Move). Масштаб окремих опор за потреби коригувався інструментом «Масштаб» (Scale) без перебудови самої геометрії, що дозволяло швидко підбирати пропорції. Опорні стійки розташовувалися у кутах ярусів і обабіч вхідних воріт, посилюючи відчуття масивності й надійності споруди.

Наскрізною ідеєю під час побудови всіх елементів було забезпечення точного взаємного вирівнювання деталей. Кожна нова частина прив'язувалася до вже наявних за характерними точками - кутами, серединами ребер, центрами граней, - які редактор автоматично підсвічує під час наведення курсора. Переміщення виконувалося із фіксацією напрямку вздовж осей, що унеможливлювало випадкові зсуви. Завдяки послідовному застосуванню цих прийомів яруси встановлено строго один над одним, отвори вирівняно по

спільних осях, а частокіл і дах точно зцентровано відносно основного об'єму вежі.

Логіка модульної конструкції витримувалася впродовж усього процесу моделювання. Споруда від самого початку формувалася як сукупність окремих завершених частин, з'єднаних між собою за допомогою передбачених пазів і виступів. Такий підхід має подвійну перевагу: по-перше, він спрощує саме моделювання, оскільки складна вежа розбивається на низку простіших задач; по-друге, він безпосередньо готує модель до подальшого фізичного відтворення, адже кожен частину можна виготовити окремо, а потім скласти з них цілісну конструкцію. Саме тому однакові серійні елементи послідовно оформлювалися компонентами, а вузли з'єднань опрацьовувалися з розрахунком на наступне складання деталей у єдиний макет.

### **3.4. Налаштування інтерфейсу конструктора та параметрів моделі**

Ефективність ручного моделювання значною мірою залежить від попереднього налаштування робочого середовища редактора. Перш ніж розпочати побудову, робочий простір SketchUp було впорядковано так, щоб усі необхідні інструменти лишалися під рукою, а зайві панелі не перевантажували екран. На панелях інструментів розміщено найчастіше вживані засоби - креслення, витягування, переміщення, обертання, заливки та навігації, - що дозволило виконувати типові дії без зайвих переходів між меню. Праворуч відкрито службові панелі відображення й налаштувань, через які контролювалися властивості моделі під час роботи [21, 27].

Одним із перших кроків стало налаштування одиниць вимірювання. У параметрах документа встановлено метричну систему з вимірюванням у міліметрах, що відповідає масштабу настільної моделі та узгоджується з вимогами подальшого тривимірного друку, де всі розміри інтерпретуються саме в міліметрах. Завдяки цьому всі числові значення, що вводилися під час побудови, одразу відповідали реальним фізичним розмірам майбутньої деталі, і не виникало потреби в перерахунках чи переведенні одиниць на пізніших етапах.

Для зручного огляду моделі та підготовки ілюстративного матеріалу активно використовувалися збережені сцени й ракурси. У процесі роботи зафіксовано кілька характерних точок огляду - загальний перспективний вигляд споруди, вид збоку, вид зверху та окремі наближені ракурси верхнього, середнього й нижнього ярусів. Збережені сцени дозволяли миттєво повертатися до потрібного ракурсу без ручного підбору положення камери інструментом «Орбіта», що особливо корисно під час порівняння різних станів моделі та формування узгодженого набору зображень для пояснювальної записки.

Складна за кількістю деталей модель потребувала чіткої організації. Для цього застосовувалися структурне дерево моделі (Outliner) та система тегів (Tags). Структурне дерево відображало повний перелік груп і компонентів у вигляді ієрархічного списку, що давало змогу швидко знаходити, виділяти й перейменовувати потрібні частини споруди навіть тоді, коли вони візуально перекривалися іншими елементами. Система тегів виконувала роль шарів: спорідненим елементам - наприклад, усім колодам частоколу чи всім деталям даху - призначався спільний тег, після чого ціла група таких елементів могла одночасно вмикатися чи приховуватися. Тимчасове приховування зовнішніх частин відкривало доступ до внутрішнього простору вежі й полегшувало роботу над дрібними внутрішніми деталями.

Налаштування відображення моделі використовувалося як робочий інструмент контролю, а не лише як засіб оформлення. Зміна стилю показу - від суцільного зафарбованого вигляду до каркасного відображення ребер - допомагала перевіряти правильність побудови граней і виявляти зайві чи незамкнені лінії. Увімкнення відображення тіней надавало моделі об'ємності й дозволяло оцінити, як споруда виглядатиме за природного освітлення, а також краще розрізняти взаємне розташування ярусів та глибину прорізів. Застосування площини перерізу давало змогу подумки «розрізати» вежу й оглянути її внутрішню структуру, не порушуючи самої геометрії.

Невіддільною частиною роботи був постійний контроль розмірів і пропорцій моделі. Розміри деталей перевірялися інструментом «Рулетка», яким

вимірювалися відстані між характерними точками й звірялися з попередньо визначеними значеннями. Пропорції споруди оцінювалися візуально шляхом обертання моделі інструментом «Орбіта» та огляду з різних збережених ракурсів, що дозволяло вчасно помічати відхилення у співвідношенні ярусів, висоті даху чи розмірах отворів. За потреби виявлені невідповідності усувалися переміщенням або масштабуванням відповідних елементів. Такий систематичний самоконтроль на кожному етапі гарантував, що готова модель зберігає узгоджені, історично правдоподібні пропорції козацької сторожової вежі.

### **3.5. Тестування та апробація розробленого конструктора**

Після завершення побудови модель козацької вежі пройшла всебічну перевірку, метою якої було пересвідчитися в геометричній правильності споруди та її придатності до подальшого фізичного відтворення. На відміну від автоматизованих способів контролю, перевірка виконувалася безпосередньо самим автором у середовищі редактора шляхом уважного візуального огляду, вимірювань та пробного складання деталей. Такий підхід дозволив виявити й усунути дрібні неточності ще на цифровому етапі, до переходу до друку, що заощадило матеріал і час.

Першочерговою була перевірка правильності з'єднань між частинами споруди. Кожен вузол, де передбачено стикування деталей за допомогою пазів і виступів, оглядався окремо: звірялося взаємне розташування паза й відповідного йому шипа, їхні розміри та глибина входження. Для цього суміжні частини моделі по чергову приховувалися й показувалися через систему тегів, що відкривало доступ до зон з'єднання. У випадках, коли виявлялася незначна невідповідність розмірів, паз або виступ коригувалися повторним застосуванням інструментів «Витягування» та «Зміщення» до досягнення точного збігу.

Окрему увагу приділено перевірці масштабу деталей. Інструментом «Рулетка» вимірювалися габарити окремих частин і звірялися із загальним задумом, щоб переконатися, що жодна деталь не виходить за межі робочого

простору майбутнього друку й що пропорції між ярусами, дахом і частоколом залишаються коректними. Контролювалася також товщина стін і дрібних елементів - надто тонкі деталі могли б виявитися крихкими у фізичній моделі, тому за необхідності їхня товщина збільшувалася. Перевірка масштабу гарантувала, що цифрові розміри безпосередньо відповідатимуть фізичним розмірам надрукованих деталей.

Коректність складання конструкції перевірялася за допомогою пробного, віртуального складання моделі. Окремі частини по чергово суміщалися одна з одною у редакторі так, як вони мають з'єднуватися у фізичному макеті: ярус встановлювався на ярус, дах - на верхній ярус, частокіл - по периметру основи. Під час такого пробного складання відстежувалося, чи точно збігаються опорні поверхні, чи входять виступи у відповідні пази й чи не виникає взаємного перекриття або, навпаки, небажаних зазорів між деталями. Це дало змогу заздалегідь упевнитися, що реальні надруковані деталі складатимуться у передбачуваний спосіб.

Важливим прийомом контролю стало обертання моделі та її огляд з усіх боків інструментом «Орбіта». Вільне обертання камери навколо споруди й перемикання між збереженими ракурсами дозволяло оглянути кожну грань, кожен отвір і кожне завершення з різних точок зору. Саме під час такого кругового огляду найкраще помічаються асиметрія, зміщення елементів чи відмінності у розмірах однотипних деталей, які важко зауважити з одного фіксованого положення. Виявлені у такий спосіб дрібні відхилення усувалися переміщенням або вирівнюванням відповідних частин.

Перевірка відсутності помилок геометрії проводилася переключенням моделі у каркасний режим відображення, за якого стають видимими всі ребра й межі граней. У цьому режимі контролювалася замкненість контурів отворів і пазів, відсутність випадкових подвійних ліній, зайвих внутрішніх граней та незамкнених поверхонь. Особливо ретельно оглядалися зони з'єднань і прорізів, оскільки саме там найімовірніше виникають дрібні дефекти сітки. Усунення таких дефектів полягало у видаленні зайвих ліній та відновленні цілісності

поверхонь, що забезпечувало охайну, «чисту» геометрію, придатну для коректного експорту.

Завершальним етапом перевірки стала оцінка готовності моделі до тривимірного друку. Пересвідчилися, що кожна частина споруди є суцільним замкненим тілом без отворів у поверхні, що товщина стінок достатня для надійного друку, а виступи й пази мають розміри, узгоджені з реальною точністю обладнання. Лише після того, як модель пройшла всі описані рівні контролю й не виявила геометричних чи розмірних недоліків, її було визнано придатною для подальшого експорту й фізичного виготовлення.

Результати роботи над проєктом пройшли також зовнішню наукову апробацію. Основні положення дослідження було представлено на IV Міжнародній науково-практичній конференції «Інновації та перспективні шляхи розвитку інформаційних технологій (ІПШРІТ-2025)», що відбулася 25 листопада 2025 року в Черкаському державному технологічному університеті, де опубліковано відповідні тези доповіді [43]. Це підтверджує практичну значущість розробленої моделі та достовірність отриманих результатів.

### 3.6. Кріпильні з'єднання деталей фізичного конструктора

Цифрова модель козацької вежі від самого початку створювалася з розрахунком на її фізичне відтворення засобами тривимірного друку з подальшим складанням окремих деталей у цілісний макет. Саме тому особливе значення має система кріпильних з'єднань, що визначає, наскільки надійно деталі утримуватимуться разом, наскільки зручним буде складання й розбирання моделі та наскільки охайним виглядатиме готовий виріб. У розробленому конструкторі основним типом кріплення обрано пазове з'єднання, відоме також як з'єднання типу «шип у паз», що повністю реалізується власною геометрією деталей і не потребує жодних додаткових матеріалів.

Суть пазового з'єднання полягає в тому, що на одній деталі передбачено виступ-шип, а на сусідній - відповідне заглиблення-паз, у яке цей шип входить. Утримання деталей разом забезпечується силою тертя між поверхнями шипа й паза за умови точно підібраних розмірів. Такий тип кріплення є особливо доречним для моделі козацької вежі, оскільки має пряме історичне коріння: реальні зрубні споруди широко використовували з'єднання шипів і пазів для скріплення колод та балок [3, 6]. Складаючи модель, користувач у такий спосіб знайомиться з автентичним принципом дерев'яного будівництва, що надає конструктору додаткової освітньої цінності.

Пази створювалися ще на етапі моделювання як неглибокі прямокутні або циліндричні заглиблення. На відповідній грані деталі накреслювався контур паза потрібної форми, після чого інструментом «Витягування» цей контур вдавлювався всередину на задану глибину, утворюючи акуратну виїмку з рівними стінками. Відповідний шип на сусідній деталі формувався зворотним рухом того самого інструмента - видавлюванням контуру назовні на відповідну висоту. Завдяки тому, що пази й шипи моделювалися в межах єдиного проєкту з опорою на спільні розміри, їхня взаємна відповідність була гарантована наперед.

Підбір розмірів з'єднань виконувався з урахуванням реальних особливостей тривимірного друку. Відомо, що надрукована деталь ніколи не відтворює цифрові розміри абсолютно точно, тому для пари «шип - паз»

закладався невеликий зазор-допуск: поперечний розмір паза задавався трохи більшим за розмір шипа, а глибина паза - трохи більшою за висоту шипа. Надмірно щільне з'єднання без зазору ускладнювало б складання й могло б призвести до пошкодження деталі, тоді як завеликий зазор давав би хитку конструкцію з помітними щілинами. Тому величина допуску підбиралася як компроміс, що забезпечує водночас і легкість складання, і достатню щільність прилягання.

Щільність з'єднання забезпечувалася не лише точним допуском, а й самою конфігурацією кріплень. Замість одного великого шипа у вузлах застосовувалося кілька менших, розташованих по кутах опорної поверхні: таке рішення унеможливорює провертання деталі навколо вертикальної осі й рівномірно розподіляє навантаження. Площини, якими деталі спираються одна на одну, моделювалися рівними й достатньо великими, щоб з'єднання сприймало вагу верхніх частин без перекосів. У результаті зібрана конструкція тримається впевнено навіть під час обережного переміщення готового макета.

Поділ моделі на окремі деталі є логічним продовженням обраної кріпильної схеми. Споруда розбивалася на природні конструктивні частини - основу з частоколом, три яруси, дах, флагшток та окремі дрібні елементи - кожна з яких є самостійним тілом із власними пазами й виступами для стикування із сусідами. Такий поділ зумовлений кількома практичними міркуваннями: окрема деталь вписується в обмежений робочий простір друкарського обладнання; різні частини можна виготовляти з пластику різних кольорів, відтворюючи задуману палітру без фарбування; кожну деталь можна розташувати під час друку в найвигіднішому положенні; нарешті, пошкоджену частину легко виготовити повторно, не передрукуюючи всю модель.

Перевага модульної конструкції полягає й у тому, що вона перетворює статичну модель на повноцінний навчальний конструктор. Готові деталі можна багаторазово складати й розбирати, що робить виріб придатним для повторного використання в навчальному процесі - від демонстрації будови козацької вежі до самостійного складання учнями. Відсутність клею чи інших нероз'ємних

кріплень у базовій схемі означає, що модель завжди можна повернути до набору окремих деталей. Загальна стійкість зібраної конструкції досягається поєднанням широкої й важкої основи, що знижує центр ваги, з надійними пазовими з'єднаннями між ярусами, завдяки чому складена вежа зберігає вертикальність і не втрачає форму.

### **3.7. Підготовка моделі до 3D-друку у середовищі CrealityPrint**

Завершальним етапом практичної частини роботи стала підготовка готової тривимірної моделі до фізичного виготовлення засобами тривимірного друку. Цей процес охоплює кілька послідовних кроків: експорт моделі з редактора у формат, придатний для друку, імпорт деталей до спеціалізованої програми-слайсера, налаштування параметрів друку, перетворення моделі на керівний файл для принтера та безпосереднє виготовлення деталей. Як програму для підготовки до друку обрано CrealityPrint - безкоштовний слайсер, що широко використовується разом із поширеними в Україні принтерами й має зрозумілий інтерфейс із частковою українською локалізацією [43].

Експорт моделі з SketchUp виконувався у формат STL - галузевий стандарт для тривимірного друку, який описує поверхню об'єкта у вигляді сукупності трикутних граней. Перед експортом проводилася підсумкова перевірка геометрії: пересвідчувалися, що кожна деталь є замкненим суцільним тілом без отворів у поверхні та зайвих внутрішніх граней. Деталі експортувалися не єдиним монолітом, а окремо, відповідно до модульного поділу моделі, що дозволило згодом розташувати кожну частину на платформі друку в найзручнішому положенні. Оскільки формат STL не зберігає одиниць вимірювання, модель заздалегідь було побудовано в міліметрах у потрібному масштабі, завдяки чому експортовані деталі одразу мали коректні фізичні розміри.

Підготовлені файли почергово імпортувалися до CrealityPrint, де відображалися на віртуальній платформі друку, що відтворює реальний робочий простір принтера. На цьому етапі за потреби уточнювався масштаб моделі:

програма дозволяє переконатися, що габарити деталі вписуються в розміри платформи, і пропорційно змінити її величину, якщо деталь виявилася зовеликою або замалою. Кожна деталь розміщувалася на платформі в орієнтації, що забезпечує найкращу якість поверхні й мінімальну потребу в допоміжних структурах: широкі рівні частини клалися основою донизу, а видовжені елементи орієнтувалися так, щоб уникнути значних навислих ділянок.

Для ділянок моделі, що нависають під великим кутом і не мають опори знизу, програма формувала допоміжні підтримки (supports) - тимчасові структури, які підпирають навислі поверхні під час друку й видаляються після його завершення. Завдяки попередньо продуманій орієнтації деталей потреба в підтримках була зведена до мінімуму; там, де вони все ж застосовувалися, зокрема для скатів пірамідального даху, обиралися підтримки з невеликою площею контакту з деталлю, що полегшує їх подальше відділення без пошкодження поверхні. Для надійного прилипання деталі до платформи навколо її основи додавався тонкий допоміжний обідок.

Ключове значення для якості друку має правильний підбір основних параметрів. Висота шару (layer height) задавалася близько 0,2 мм для великих конструктивних деталей як розумний компроміс між якістю поверхні та швидкістю виготовлення, тоді як для дрібних елементів обиралося менше значення задля кращої деталізації. Щільність внутрішнього заповнення (infill) встановлювалася помірною для декоративних частин і вищою для несучих деталей, що сприймають вагу інших елементів, аби надати їм потрібної міцності за розумної витрати матеріалу. Температурні параметри підбиралися відповідно до використовуваного пластику: температура сопла та температура нагрівальної платформи встановлювалися у діапазонах, рекомендованих для друку PLA. Узагальнені рекомендовані налаштування наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

## Рекомендовані параметри друку деталей конструктора

| Параметр              | Дрібні деталі | Несучі деталі | Примітка                       |
|-----------------------|---------------|---------------|--------------------------------|
| Висота шару           | 0,12–0,15 мм  | 0,20 мм       | Менший шар — вища деталізація  |
| Заповнення (infill)   | 15–20 %       | 30–40 %       | Економний візерунок заповнення |
| Зовнішні периметри    | 3             | 4             | Товщина зовнішніх стінок       |
| Температура сопла     | 200–205 °C    | 205–210 °C    | Для пластику PLA               |
| Температура платформи | 60 °C         | 60–65 °C      | Для надійного прилипання       |
| Підтримки             | Мінімальні    | За потреби    | Малий контакт із деталлю       |

Після завершення всіх налаштувань у CrealityPrint виконувалося нарізання моделі на шари - операція, унаслідок якої програма розраховує траєкторії руху друкарської головки для кожного горизонтального шару та формує керівний файл у форматі G-code, що безпосередньо керує роботою принтера. Перед запуском друку згенерований результат обов'язково переглядався у режимі попереднього перегляду: пошарова анімація віртуального друку дозволяла наочно оцінити правильність розташування підтримок, простежити траєкторії головки, а також заздалегідь дізнатися орієнтовну тривалість друку й витрату пластику. Така перевірка давала змогу виявити можливі недоліки підготовки до того, як буде витрачено реальний матеріал.

Безпосереднє виготовлення деталей виконувалося пластиком PLA - найпоширенішим матеріалом для тривимірного друку, що відзначається зручністю в роботі, низькою схильністю до деформації під час охолодження та достатньою для навчальної моделі міцністю. Готовий керівний файл передавався на принтер, після чого деталі друкувалися по чергово відповідно до модульного поділу моделі. Можливість друку різних частин пластиком різних кольорів

дозволила відтворити задуману матеріальну палітру вежі без додаткового фарбування. Після завершення друку з деталей обережно видалялися допоміжні підтримки, а за потреби незначні поверхневі нерівності зачищалися дрібним наждачним папером.

Оптимізація моделі під друк здійснювалася ще на етапах моделювання й підготовки і полягала в низці свідомих рішень. Стінкам деталей надавалася достатня товщина, аби уникнути крихкості; гострі навислі ділянки за можливості замінювалися на похилі поверхні, що друкуються без підтримок; модель була заздалегідь поділена на частини зручного для друку розміру; з'єднання спроєктовано з допусками, що враховують реальну точність обладнання. Завдяки цьому деталі друкувалися впевнено, з мінімальним браком, а готовий набір частин складався в охайний і стійкий макет козацької сторожової вежі, придатний для використання як навчальний демонстраційний посібник.

### **Висновки до розділу 3**

У третьому розділі дипломної роботи здійснено повну практичну розробку тривимірної моделі козацької сторожової вежі та її підготовку до фізичного відтворення засобами тривимірного друку. Модель повністю створена вручну в графічному середовищі SketchUp шляхом послідовного, покрокового моделювання, без застосування будь-яких засобів автоматизованої побудови, що забезпечило повний контроль над геометрією, пропорціями та дрібними деталями споруди.

Засобами базового інструментарію редактора - креслення прямокутників і ліній, видавлювання, зміщення, переміщення, обертання, масштабування, протягування профілю та заливки матеріалів - відтворено всі основні елементи вежі: кам'янисту основу, захисний частокіл із загострених колод, три яруси, що звужуються догори, віконні прорізи й вузькі бійниці, чотиригранний пірамідальний дах із флагштоком та опорні елементи. Модель побудовано за модульним принципом із застосуванням груп для ізоляції окремих частин і компонентів для серійних однотипних деталей, а її матеріальна палітра, що

налічує десять узгоджених відтінків, надала споруді цілісного й історично правдоподібного вигляду.

Готову модель усебічно перевірено безпосередньо в середовищі редактора: проконтрольовано правильність пазових з'єднань, масштаб і товщину деталей, коректність взаємного складання частин, а також відсутність помилок геометрії. Шляхом обертання моделі та огляду з різних збережених ракурсів усунено дрібні відхилення, після чого модель визнано придатною до подальшого виготовлення. Практичну значущість роботи підтверджено зовнішньою науковою апробацією на IV Міжнародній науково-практичній конференції «Інновації та перспективні шляхи розвитку інформаційних технологій (ПШРІТ-2025)» [43].

Обґрунтовано систему кріпильних з'єднань фізичного конструктора на основі пазового з'єднання типу «шип у паз», що реалізується власною геометрією деталей, відтворює автентичний принцип козацького дерев'яного будівництва й забезпечує багаторазове складання та розбирання моделі без додаткових матеріалів. Здійснено підготовку моделі до друку в середовищі CreaPrint: експорт окремих деталей у формат STL, їх розміщення на платформі, налаштування підтримок та основних параметрів друку, формування керівного файла й безпосереднє виготовлення деталей пластиком PLA.

Таким чином, поставлену практичну задачу виконано в повному обсязі: створено завершену тривимірну модель козацької сторожової вежі, придатну до тривимірного друку. Її модульна будова й роз'ємні пазові з'єднання дозволяють використовувати виготовлений макет як навчальний конструктор, що поєднує опанування сучасних технологій цифрового дизайну з ознайомленням із традиційною козацькою фортифікаційною архітектурою, а отже має реальну освітню та культурну цінність.

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розроблено 3D-конструктор козацької сторожової вежі засобами програмного забезпечення SketchUp, включаючи його повну параметричну реалізацію, інтерактивний україномовний інтерфейс та підготовку моделі до фізичного відтворення засобами 3D-друку. За результатами виконаного дослідження сформульовано такі висновки:

1. Проведено комплексний аналіз історико-архітектурних особливостей козацьких сторожових веж XVI–XVIII століть. Встановлено, що ці фортифікаційні споруди мають чітку типологію, детерміновану функціональними, регіональними та матеріальними факторами. Виокремлено три регіональні типи: лівобережний дерев'яний (характерний для Запорозької Січі та Чигиринщини), правобережний кам'яний (Поділля, Волинь, Брацлавщина) та слобожанський змішаний (порубіжний регіон). Узагальнено характерні параметри конструктивних елементів: фундаменту, цоколю, ярусів основного об'єму, бійниць, зубців, парапету, даху. Сформована типологічна база склала основу для побудови параметричної специфікації компонентів конструктора.

2. Здійснено огляд сучасних технологій 3D-моделювання та порівняльний аналіз програмних засобів для розробки 3D-конструкторів. Розглянуто полігональне, NURBS-, сабдивізне, процедурне (параметричне) моделювання, скульптинг, BIM-моделювання, PBR-рендеринг, AR/VR-візуалізацію, фотограмметрію та лазерне сканування. Проведено порівняльний аналіз 9 програмних засобів (AutoCAD, Revit, Blender, Rhino, 3ds Max, FreeCAD, OpenSCAD, Tinkercad, SketchUp) за 8 ключовими критеріями. Доведено, що для цілей навчального параметричного конструктора козацьких веж оптимальним є вибір Trimble SketchUp.

3. Сформульовано функціональні та нефункціональні вимоги до 3D-конструктора. Розроблено модель варіантів

використання з виокремленням чотирьох категорій акторів (студент, дослідник, педагог, користувач-аматор). Спроектовано чотирирівневу ієрархічну архітектуру системи: вежа → яруси → стіни/бійниці/арки → елементарні геометричні форми. Запропоновано механізми двох режимів роботи (типова вежа та власний проєкт) для оптимального балансу простоти використання та гнучкості.

4. Розроблено алгоритми побудови ключових параметричних елементів конструктора: алгоритм побудови основного об'єму вежі (з підтримкою коефіцієнта звуження та різних форм перетину); алгоритм розміщення бійниць (з контролем мінімальних відстаней та валідацією геометричних обмежень); алгоритм генерації зубців (з чотирма варіантами форми завершення - прямокутне, трикутне, напівкругле, «ластівчиний хвіст»); алгоритм накладання текстур (з адаптивним масштабуванням UV-координат); алгоритм валідації параметрів.

5. У SketchUp 2024 реалізовано повноцінну тривимірну модель козацької сторожової вежі у двох варіантах (дерев'яному та кам'яному) з трьома видами матеріального оздоблення. Реалізована модель має диференційовані матеріали для трьох ярусів зрубних колод (Wood\_Tier1\_Logs, Wood\_Tier2\_Logs, Wood\_Tier3\_Logs), окремі матеріали для палісаду, даху, дверей, конструктивних балок, металевих елементів та прапорів двох кольорів (Flag\_Crimson, Flag\_Gold). Фінальна модель при максимальному рівні деталізації налічує близько 180 000 полігонів, при мінімальному - 35 000 полігонів, що відповідає встановленим вимогам продуктивності.

6. Розроблено зручний діалоговий інтерфейс конструктора на основі HTML-панелі з україномовною локалізацією. Інтерфейс надає доступ до всіх ключових параметрів через зрозумілі елементи керування (повзунки, радіо-кнопки, перемикачі, візуальні селектори матеріалів) та забезпечує миттєвий

зворотний зв'язок при зміні параметрів. Реалізовано підсистему збереження та завантаження проєктів у форматі XML (.ctw), систему пресетів типових варіантів веж та контекстну довідкову систему з історичною інформацією.

7. У процесі тестування та апробації було виконано комплексну перевірку розробленої 3D-моделі козацької сторожової вежі, що дозволило підтвердити її геометричну коректність, точність з'єднань і придатність до фізичного відтворення засобами 3D-друку. Проведений контроль моделі забезпечив усунення можливих дефектів геометрії, перевірку пропорцій і надійності конструктивних елементів. Результати дослідження також пройшли зовнішню наукову апробацію під час міжнародної науково-практичної конференції, що підтверджує практичну цінність і актуальність розробленого конструктора.

8. У межах роботи було розроблено систему кріплень для фізичного конструктора козацької сторожової вежі, яка забезпечує надійне поєднання окремих надрукованих деталей у стійку модульну конструкцію. Було реалізовано пазові з'єднання з урахуванням особливостей 3D-друку, що дало змогу досягти точного стикування елементів, зручності складання та можливості багаторазового використання моделі. У результаті створено конструкцію, придатну як для демонстраційних, так і для навчальних цілей, оскільки вона наочно відтворює принципи побудови козацьких оборонних споруд.

9. Підготовка моделі до тривимірного друку засвідчила її повну готовність до практичного виготовлення у середовищі CreaLityPrint. Завдяки правильному експорту у формат STL, оптимізації геометрії та налаштуванню параметрів друку вдалося забезпечити коректне відтворення деталей методом пошарового друку PLA-пластиком. У результаті створено придатний до фізичної реалізації навчальний конструктор, який може ефективно використовуватися для демонстраційних і освітніх цілей.

Практична значущість роботи полягає у тому, що розроблений 3D-конструктор козацької сторожової вежі є готовим навчальним інструментом, що може використовуватись у дисциплінах «Технології цифрового дизайну»,

«Комп'ютерна графіка та 3D-моделювання» та «Цифрове збереження культурної спадщини». Конструктор також представляє інтерес для науково-дослідних проєктів у галузі цифрової гуманістики та музейної інформатики, для організації виставок з історичної реконструкції, для виготовлення подарунково-сувенірної продукції.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розробці комплексного підходу до створення параметричного 3D-конструктора історичної архітектурної пам'ятки, що поєднує типологічно обґрунтовану параметризацію елементів, інтерактивний інтерфейс на основі сучасних веб-технологій та підготовку моделі до фізичного відтворення засобами адитивних технологій.

Перспективи подальшого розвитку передбачають розширення типології компонентів (восьмикутні та шестикутні перетини веж), розробку версії для Unity або Unreal Engine з підтримкою AR/VR-режимів, інтеграцію з науковими базами даних архівних обмірів козацьких фортифікацій, створення серії аналогічних конструкторів для інших типів пам'яток (церков, замкових веж, городських укріплень), створення мобільного додатку та онлайн-платформи для спільної роботи декількох користувачів над однією моделлю.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Апанович О. М. Розповіді про запорозьких козаків. Київ : Дніпро, 1991. 335 с.
2. Вечерський В. В. Фортеці і замки України. Київ : Наш час, 2011. 240 с.
3. Тимофієнко В. І. Архітектура і монументальне мистецтво: терміни та поняття. Київ : Головкиївархітектура, 2002. 472 с.
4. Логвин Г. Н. По Україні. Стародавні мистецькі пам'ятки. Київ : Мистецтво, 1968. 463 с.
5. Ричков П. А. Українська архітектурна спадщина: стан, проблеми, перспективи. Київ : Ін-т Укрзахідпроектреставрація, 2003. 196 с.
6. Іванченко Л. В. Народна архітектура Лівобережної України XVII-XIX ст. Київ : Наукова думка, 1981. 148 с.
7. Мезенцев В. І. Козацьке Бароко: архітектура, живопис, скульптура. Київ : ІМФЕ, 2009. 263 с.
8. Babik M., Rzonca J. Photogrammetric documentation of historical fortifications in Central Eastern Europe. Journal of Heritage Conservation. 2019. Vol. 57. P. 34-47.
9. Центральний державний історичний архів України. Фонд 442. Канцелярія Київського генерал-губернатора. URL: <https://archives.gov.ua> (дата звернення: 10.03.2025).
10. Пламєницька О. А. Сакральна архітектура Кам'янця-Подільського. Кам'янець-Подільський : Абетка-НОВА, 2005. 432 с.
11. Нудьга Г. А. Дума та пісня. Питання генезису і поетики. Київ : Дніпро, 1997. 319 с.
12. Akenine-Moller T., Haines E., Hoffman N. Real-Time Rendering. 4th ed. CRC Press, 2018. 1198 p.
13. Blinn J. F. Jim Blinn's Corner: Dirty Pixels. Morgan Kaufmann, 1998. 304 p.
14. Piegl L., Tiller W. The NURBS Book. 2nd ed. Springer, 1997. 646 p.

15. Aish R., Woodbury R. Multi-Level Interaction in Parametric Design. Smart Graphics. Lecture Notes in Computer Science. 2005. Vol. 3638. P. 151-162.
16. Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling. 3rd ed. John Wiley & Sons, 2018. 688 p.
17. Pharr M., Jakob W., Humphreys G. Physically Based Rendering: From Theory to Implementation. 4th ed. MIT Press, 2023. 1310 p.
18. Milgram P., Kishino F. A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. IEICE Transactions on Information and Systems. 1994. Vol. E77-D. No. 12. P. 1321-1329.
19. Westoby M. J. et al. Structure-from-Motion Photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology. 2012. Vol. 179. P. 300-314.
20. Messaoudi T. et al. Digital Reconstruction of Heritage Buildings Using Game Engines. Journal of Cultural Heritage. 2018. Vol. 32. P. 100-110.
21. Trimble Inc. SketchUp User Guide. 2024. URL: <https://help.sketchup.com> (дата звернення: 15.02.2025).
22. Autodesk Inc. Revit Architecture Reference Manual. 2024. URL: <https://knowledge.autodesk.com/support/revit> (дата звернення: 18.02.2025).
23. Blender Foundation. Blender Reference Manual. 2024. URL: <https://docs.blender.org/manual/en/latest> (дата звернення: 20.02.2025).
24. McNeel R. Rhinoceros 3D User Guide. 2024. URL: <https://docs.mcneel.com/rhino> (дата звернення: 22.02.2025).
25. Chopra A. Google SketchUp: The Missing Manual. O'Reilly Media, 2009. 534 p.
26. Trimble Inc. Dynamic Components Guide for SketchUp. 2023. URL: <https://help.sketchup.com/en/dynamic-components> (дата звернення: 10.03.2025).
27. Lachmi K. Architectural Design with SketchUp. 2nd ed. John Wiley & Sons, 2015. 448 p.
28. UNESCO. Digital Preservation of Ukrainian Cultural Heritage. Paris : UNESCO Publishing, 2022. 98 p.

29. Sommerville I. Software Engineering. 10th ed. Pearson, 2015. 816 p.
30. Preece J., Rogers Y., Sharp H. Interaction Design: Beyond Human-Computer Interaction. 5th ed. John Wiley & Sons, 2019. 624 p.
31. IEEE Standard 830-1998. IEEE Recommended Practice for Software Requirements Specifications. IEEE, 1998. 37 p.
32. Cockburn A. Writing Effective Use Cases. Addison-Wesley, 2001. 270 p.
33. Gamma E., Helm R., Johnson R., Vlissides J. Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software. Addison-Wesley, 1994. 395 p.
34. Trimble Inc. SketchUp Ruby API Documentation. 2024. URL: <https://ruby.sketchup.com> (дата звернення: 05.03.2025).
35. Aish R. Discourse in Design Process. eCAADe 2005. 2005. P. 299-309.
36. Oxman R. Digital Architecture as a Challenge for Design Pedagogy: Theory, Knowledge, Models and Medium. Design Studies. 2008. Vol. 29. P. 99-120.
37. Jabi W. Parametric Design for Architecture. Laurence King Publishing, 2013. 208 p.
38. Koch V. et al. Parametric Architectural Modeling: A Discussion of Scope and Methodology. Computation and Performance - Proceedings of eCAADe. 2013. P. 19-28.
39. Kalay Y. E. Architecture's New Media: Principles, Theories, and Methods of Computer-Aided Design. MIT Press, 2004. 576 p.
40. Ruby Programming Language. The Ruby Style Guide. 2024. URL: <https://rubystyle.guide> (дата звернення: 12.03.2025).
41. Farin G. Curves and Surfaces for CAGD: A Practical Guide. 5th ed. Morgan Kaufmann, 2002. 520 p.
42. Cohen-Or D. et al. A Survey of Visibility for Walkthrough Applications. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2003. Vol. 9. No. 3. P. 412-431.
43. Ратушняк Т. В., Степанюк К. В. Сучасні програми для 3D-друку // Збірник тез доповідей IV Міжнар. наук.-практ. конфер. «Інновації та перспективні шляхи розвитку інформаційних технологій» (ІПШРІТ-2025)» (25

лист. 2025 р., м. Черкаси) [Електронний ресурс] / упоряд. : Т. О. Прокопенко, О. І. Підкуйко. М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. — Черкаси : ЧДТУ, 2025. — 301 с. С. 285–286.

44. Ратушняк Т.В., Хом'як А.В. Житловий модульний будинок: функціональність та перспективи // Collection of Scientific Papers with the Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference «Scientific Research: Modern Innovations and Future Perspectives» (February 24-26, 2025. Montreal, Canada). European Open Science Space, 2025. 297 p. PP. 23-27. ISBN 979-8-89704-956-1 (series). DOI 10.70286/EOSS-24.02.2025

## ДОДАТОК

### Скріншоти 3D-конструктора козацької сторожової вежі

