

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет (ННІ) Конструювання та дизайну

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

Нарисної геометрії, комп'ютерної  
графіки та дизайну  
(назва кафедри)

Сергій ПИЛИПАКА

(підпис)

(ПІБ)

— ” ————— 2025 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему СТВОРЕННЯ ВІРТУАЛЬНОГО СИМУЛЯТОРА РОБОТИ ЗД  
ПРИНТЕРА

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування  
(код і назва)

Гарант освітньої програми

д.т.н., професор  
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Володимир БУЛГАКОВ  
(ПІБ)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

д.т.н., професор  
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Сергій ПИЛИПАКА  
(ПІБ)

к.т.н.  
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Андрій НЕСВІДОМІН  
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Яковлева Анастасія Миколаївна

(ПІБ студента)

КИЇВ – 2025

Додаток Д

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет (ННІ) Конструювання та дизайну

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Нарисної геометрії, комп'ютерної  
графіки та дизайну

Д.Т.Н., професор \_\_\_\_\_ Сергій ПИЛИПАКА  
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ПІБ)

— ” \_\_\_\_\_ 2025 р.

**З А В Д А Н Н Я**

на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту

Яковлєвої Анастасії Миколаївни

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування

(код і назва)

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проекту бакалавра)

**СТВОРЕННЯ ВІРТУАЛЬНОГО СИМУЛЯТОРА РОБОТИ 3Д ПРИНТЕРА**

затверджена наказом ректора НУБіП України від «16» грудня 2024 р. №2265 «С»

Термін подання завершеної роботи (проекту) на кафедру 2025 червня 15

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проекту бакалавра)

Технологічна схема 3д принтера

Перелік питань, які потрібно розробити:

1. Провести аналіз існуючих віртуальних симуляторів та 3д принтерів
2. Розглянути перспективи співпраці симулятора і 3д принтера
3. Створення віртуального середовища для роботи 3д принтера
4. Розглянути питання охорони праці
5. Виконати розрахунок економічної ефективності

Перелік графічних документів (за потреби)

1. Загальний вигляд

Дата видачі завдання «16» грудня 2024 р.

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Сергій ПИЛИПАКА  
(прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Андрій НЕСВІДОМІН  
(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Анастасія ЯКОВЛЄВА  
(прізвище та ініціали студента)

## ЗМІСТ

### НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕР

ЗМІСТ.....	4
РЕФЕРАТ.....	5
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯДОВА ЧАСТИНА .....	8
1.1. Актуальність розробки .....	8
1.2. Загальні відомості про віртуальні симулятори .....	10
1.3. Загальні відомості 3д принтери .....	13
1.4. Вибір віртуального симулятора і 3д принтера.....	16
1.5. Встановлення напрямку дослідження.....	18
РОЗДІЛ 2. СТВОРЕННЯ ВІРТУАЛЬНОГО СИМУЛЯТОРА .....	20
2.1. Створення середовища симулятора .....	20
2.2. Налаштування інтерфейсу симулятора .....	27
2.3. Налаштування 3Д принтера .....	33
2.4. Процес роботи 3Д принтера.....	37
2.5. Інтерфейс користувача .....	39
РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	44
РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ .....	47
4.1. Економічний ефект .....	48
4.2. Окупність за один рік .....	48
ВИСНОВКИ.....	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	51

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ЗМІСТ	Літ.	Арк.	Акрушіє
Розроб.		Яковлева А.					4	
Перевір.		Несвідомін А.						
Н. Контр.								
Затверд.								
						НУБіП України		

## РЕФЕРАТ

Бакалаврська кваліфікаційна робота складається з пояснювальної записки на 51 аркушах друкованого тексту, містить 4 розділи, висновки, список використаних джерел із ... найменувань, 34 рисунка, 2 таблиць і додатки.

У першому розділі розглянуто загальні відомості про симулятори та 3д принтери. Їх сумісність з одні одного і план розробки роботи.

Другий розділ присвячено розрахунку розробці віртуального середовища і інтерфейсу симулятора для роботи з 3д принтером. Опис самої роботи.

У третьому розділі розглянуто питання охорони праці при навчанні 3д принтером у реальних і віртуальних умовах , визначено основні вимоги до безпеки, можливі ризики та заходи їх мінімізації, а також правила технічного обслуговування і ремонту.

Четвертий розділ містить розрахунок економічної ефективності навчанням роботи 3д принтера. Проведено аналіз витрат на матеріали, навчання, обслуговування та страхову. Оцінено економічну доцільність проєкту, що підтверджує його фінансову привабливість і конкурентоспроможність.

Ключові слова:

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Яковлева А.			Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Несвідомін А.				5	
Н. Контр.					РЕФЕРАТ НУБіП України		
Затверд.							

## ВСТУП

У сучасному світі стрімкий розвиток цифрових технологій дедалі активніше впливає на різні сфери промисловості, освіти та побуту. Однією з таких технологій є 3D-друк — інноваційний метод виготовлення фізичних об'єктів шляхом пошарового накладання матеріалу за цифровою моделлю. Проте ефективне використання 3D-принтерів потребує глибокого розуміння принципів їхньої роботи, налаштування параметрів друку та вміння уникати типових помилок, що виникають у процесі виготовлення виробів. Особливо це актуально для початківців, студентів технічних спеціальностей та працівників, які опановують нову техніку.

Одним із дієвих інструментів у цьому напрямі є віртуальні симулятори, які дозволяють моделювати процеси без потреби у фізичному обладнанні. Розробка віртуального симулятора роботи 3D-принтера дає можливість користувачам вивчати принципи його функціонування, тренуватися у налаштуванні параметрів, аналізувати помилки та оптимізувати процес без ризику пошкодження обладнання чи витрат матеріалу.

В умовах сьогодення, коли Україна стикається з викликами війни, економічних змін та обмеженого доступу до високотехнологічного обладнання в навчальних закладах, подібні симулятори стають особливо актуальними. Вони дають змогу студентам, викладачам та підприємцям продовжувати освітній і виробничий процес у безпечному та доступному форматі. Крім того, розвиток цифрових рішень, зокрема симуляційних систем, сприяє цифровій трансформації країни та підвищенню технологічної незалежності.

У агрономії 3D-друк і відповідні симулятори відкривають нові можливості для досліджень та практичного навчання. За допомогою 3D-принтера можна створювати прототипи насінневих сошників, систем

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Яковлева А.			ВСТУП	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Несвідомін А.					6	
Н. Контр.						НУБіП України		
Затверд.								

зрошення, форсунок для точного внесення добрив, а також лабораторного обладнання для аналізу ґрунту й рослинних зразків. Віртуальний симулятор дозволяє агрономам та студентам відпрацьовувати проєктування й налаштування таких пристроїв, перевіряти їхню конструкцію та функціональність віртуально, перш ніж виготовляти реальні деталі. Це суттєво скорочує витрати на матеріали, прискорює дослідницький цикл і сприяє впровадженню інновацій в сільськогосподарське виробництво.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

## РОЗДІЛ 1. ОГЛЯДОВА ЧАСТИНА

### 1.1. Актуальність розробки

Створення віртуального симулятора роботи 3D принтера є надзвичайно актуальною, оскільки він дозволяє відтворювати процеси друку й відпрацьовувати навички налаштування та обслуговування обладнання без ризику пошкодження пристрою чи зайвих витрат матеріалів. Такий симулятор дає змогу моделювати різні технологічні сценарії та тестувати нові матеріали в умовах, які важко або дорого реалізувати на реальному принтері.

*Загальні переваги віртуального 3D-симулятора:*

#### 1. Ефективне навчання:

Користувачі можуть проводити багаторазові віртуальні «друки» з відпрацюванням налаштувань температури, швидкості й подачі матеріалу, що сприяє швидшому оволодінню технікою роботи з принтером.

#### 2. Безпека обладнання:

Симулятор працює без фізичного пристрою, тому виключається ризик поломки принтера через некоректні параметри або помилки користувача.

#### 3. Зниження витрат:

Відсутність витрат на філамент, електроенергію та сервісне обслуговування реального принтера робить навчання й прототипування значно дешевшими.

#### 4. Можливість моделювання різноманітних сценаріїв:

Від друку складних геометричних форм до експериментів із новими матеріалами — симулятор дозволяє швидко переключатися між завданнями і перевіряти гіпотези без фізичних обмежень.

#### 5. Оптимізація робочих процесів:

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	РОЗДІЛ 1. ОГЛЯДОВА ЧАСТИНА	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Розроб.</i>		Яковлєва А.					8	
<i>Перевір.</i>		Несвідомін А.						
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Затверд.</i>								
						НУБіП України		

Інтерактивні звіти та аналітика в симуляторі допомагають відстежувати критичні параметри кожного “друку” та поступово підвищувати якість та швидкість виготовлення виробів.

*Актуальність у різних сферах:*

*1. Освіта та підготовка кадрів:*

Студенти технічних і дизайнерських спеціальностей можуть засвоювати принципи 3D-друку й експериментувати з налаштуваннями без потреби в дорогому обладнанні.

*2. Промислове прототипування:*

Інженери та конструктори отримують інструмент для швидкої перевірки й оптимізації конструкцій деталей перед запуском їх у серійне виробництво.

*3. Наукові дослідження:*

Вчені можуть моделювати поведінку різних матеріалів при друці, відпрацьовувати нові рецептури композитів та оцінювати їхню придатність без фізичних випробувань.

*4. Сільське господарство та агрономія:*

Можливість прототипувати інструменти для посіву, системи дозованого внесення добрив чи обладнання для аналізу ґрунту сприяє швидшому впровадженню інновацій у агро-виробництво.

*Актуальність для України:*

У нинішніх умовах обмеженого доступу до імпортного обладнання та дефіциту фінансування для закупівель, віртуальний симулятор 3D-друку стає важливим ресурсом для українських навчальних закладів, наукових інститутів і малих виробництв. Він сприяє:

- Підвищенню технологічної незалежності шляхом розвитку навичок внутрішнього прототипування й локального виробництва деталей.
- Прискоренню інноваційного циклу в агросекторі, медицині та машинобудуванні без значних капітальних витрат.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

- Збереженню обмежених ресурсів, оскільки віртуальне тестування замінює велику кількість фізичних експериментів.

Таким чином, створення віртуального симулятора роботи 3D-принтера є важливою складовою цифрової трансформації України та створює передумови для сталого розвитку високотехнологічних галузей в умовах сучасних викликів.

## 1.2. Загальні відомості про віртуальні симулятори

Віртуальні симулятори — це програмні середовища, які відтворюють реальні фізичні процеси та дозволяють користувачам взаємодіяти з віртуальними об'єктами в реальному часі. Вони поєднують у собі алгоритми фізичного моделювання, 3D-графіку, анімацію та інструменти для налаштування параметрів середовища. У контексті симулятора 3D-друку такі системи забезпечують візуалізацію руху екструдера, поведінку матеріалу під час шару-за-шаром накладання та індикацію потенційних помилок (застої, підтікання, розшарування).

### *Ключові компоненти віртуальних симуляторів:*

- Фізичний рушій (Physics Engine): визначає закони руху й взаємодії твердих тіл (наприклад, Bullet, PhysX).
- Графічний рушій (Rendering Engine): відповідає за реалістичне відтворення об'єктів і світлових ефектів (наприклад, OpenGL, DirectX).
- Інтерфейс користувача (UI/UX): забезпечує зручний доступ до налаштувань, відображення параметрів друку та візуалізацію даних.
- Модуль аналітики: збирає статистику по кожному віртуальному «друку», генерує звіти та рекомендації для оптимізації процесу.

### *Популярні платформи та рушії для створення симуляторів:*

- Unity — найбільш розповсюджений ігровий рушій, що має потужний набір інструментів для 3D-моделювання, модулів фізики (через інтеграцію з PhysX), можливість написання скриптів на C# та широке

					Арк.
					10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ

співтовариство розробників.

- Unreal Engine — рушій з високою якістю візуалізації та власним фізичним движком Chaos; підходить для симуляцій, де пріоритетом є фотореалістика.

- Gazebo — відкритий симулятор, популярний у робототехніці, дозволяє поєднувати моделі в ROS (Robot Operating System) та налаштовувати складні динамічні середовища.

- Blender — хоч передусім це інструмент для 3D-моделювання, у поєднанні з плагінами (наприклад, Animation Nodes) може слугувати простим симулятором руху та взаємодії об'єктів.

- WebGL-/Three.js-базовані рішення — легковагові симулятори, що працюють безпосередньо в браузері, без потреби встановлювати додаткове ПЗ.

#### *Типи симуляторів за сферою застосування:*

1. Освітні симулятори (edutainment) — призначені для навчання й тренувань користувачів без стресу реального обладнання.

2. Промислові симулятори — використовуються на виробництві для відпрацювання технологічних операцій, підтримки технічного обслуговування й оптимізації процесів.

3. Наукові й дослідницькі симулятори — дають змогу вченим моделювати нові матеріали та складні фізико-хімічні процеси.

4. Веб-симулятори — швидкий доступ через браузер, часто застосовуються для демонстрацій і маркетингу технологій.

Застосування сучасних рушіїв та платформ дозволяє створювати гнучкі, масштабовані й візуально привабливі симулятори 3D-друку, які можуть інтегруватися із зовнішніми базами даних, аналітичними сервісами та апаратними контролерами реальних принтерів. Це формує міцну основу для розвитку навичок користувачів, підвищення ефективності досліджень і впровадження інновацій у виробництво.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Таблиця 1.1.

## Порівняльний аналіз симуляторів

Тип симулятора	Переваги	Недоліки
Unity	Широке ком'юніті та документація, крос-платформеність, вбудований фізичний рушій PhysX, гнучкість скриптингу на C#, Asset Store.	Ліцензійні витрати, продуктивність, час стар-тапу.
Unreal Engine	Найвища якість візуалізації, вбудований рушій Chaos, Blueprints, безкоштовна ліцензія.	Високі системні вимоги, крута крива навчання, розмір збірки.
Blender (+ плагіни)	Безкоштовність та відкритий код, потужні інструменти моделювання, Animation Nodes / Sverchok.	Відсутність «коробкового» фізичного рушія для друку, нестандартна архітектура, менше документації.

**Висновок:** Віртуальні симулятори забезпечують безпечне й економне моделювання фізичних процесів та навчання користувачів. Вони поєднують сучасні фізичні (PhysX, Chaos) і графічні рушії (OpenGL, DirectX) з інтуїтивними UI-модулями, що дозволяє відпрацювати навички без ризику пошкодження обладнання й зайвих витрат матеріалів. Вибір платформи — Unity, Unreal Engine, Gazebo, Blender чи WebGL/Three.js — визначається вимогами проєкту: якістю візуалізації, інтеграцією з робототехнікою, відкритістю коду чи доступністю в браузері. Гнучкі рішення сприяють

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

ефективності освітніх, наукових і промислових процесів та прискорюють інновації.

### 1.3. Загальні відомості 3D принтери

3D-принтери — це пристрої для послойного формоутворення фізичних моделей на основі цифрових 3D-моделей. Вони належать до адитивних технологій виробництва й дозволяють створювати деталі складної геометрії без використання традиційного інструментального обладнання.

*Основні компоненти 3D-принтера (рис.1.1):*

- Екструдер (Hotend і Coldend): подає та плавить філамент (наприклад PLA, ABS, PETG) перед його розпиленням на робочу поверхню.
- Платформа побудови: нагрівальна або холодна робоча поверхня, на якій формується шар.
- Каркас і механіка руху: шарніри, рейки, ремені і крокові двигуни (XYZ), що забезпечують точне позиціонування екструдера й платформи.
- Контролер (плата управління): виконує команди G-коду, керує нагрівом, рухом та датчиками.
- Електроніка та ПО: прошивка (Marlin, Klipper), програми для нарізки моделі на шари (Cura, PrusaSlicer, Simplify3D).

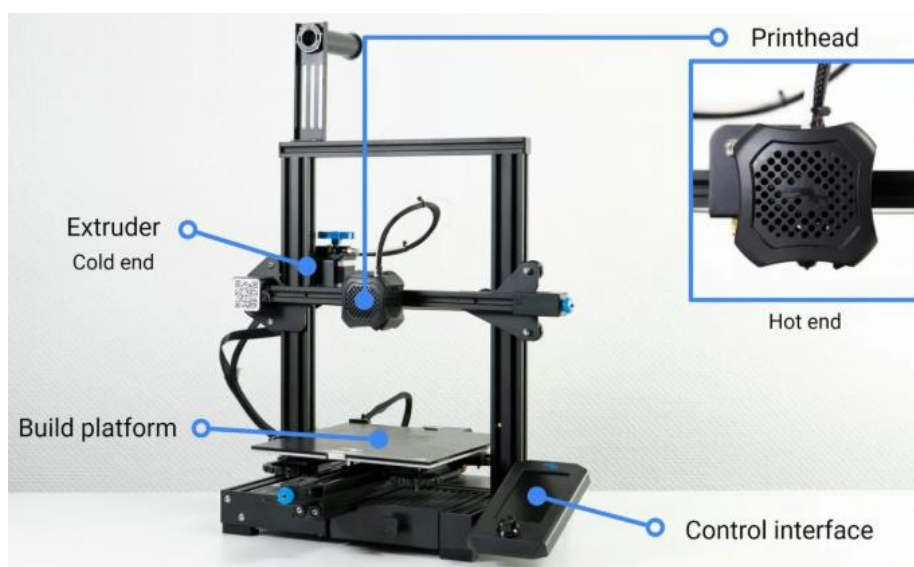


Рис.1.1. Основні компоненти

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

*Популярні виробники та моделі 3D-принтерів:*

- JGMaker Magic (рис.1.2,а): бюджетні настільні моделі з відкритою конструкцією й простою прошивкою.
- Creality Ender 3 (та Ender 3 V2/Pro) (рис.1.2,б): одна з найпоширеніших DIY-моделей завдяки низькій ціні й великому ком'юніті користувачів.
- Anycubic i3 Mega / Anycubic Vyper (рис.1.2,в): прості в налаштуванні, з сенсорним екраном, автонівелюванням платформи.
- Prusa i3 MK3S+ (рис.1.2,г): професійний відкритокодний принтер із відмінною надійністю, детальною документацією й активною підтримкою від виробника.
- Ultimaker S3 / S5 (рис.1.2,д): індустріальні рішення для малого виробництва, з подвійним екструдером і високою точністю друку.
- Formlabs Form 3 (SLA) (рис.1.2,є): принтер на фотополімерній технології стереолітографії, що забезпечує надтонкі деталі з високою роздільною здатністю.
- MakerBot Replicator+ (рис.1.2,е): ранній комерційний лідер у сегменті FDM-принтерів, популярний в освіті та корпораціях.



а



б



в

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14



Г



Д



Є



Е

Рис.1.2. Популярні 3д принтери

Вибір конкретної моделі залежить від завдань: швидкого прототипування (Ender 3, Anycubic), високої точності та надійності (Prusa, Ultimaker), тонких деталізацій (Formlabs) або економічності й простоти обслуговування (JGMaker, MakerBot).

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

## Порівняльний аналіз 3д принтерів

Тип 3д принтера	Переваги	Недоліки
JGMaker Magic	Дуже доступна ціна, проста конструкція та невелика вага, відкритий дизайн.	Обмежена стабільність платформи, базова електроніка та драйвери, менше підтримки спільноти.
Prusa i3 MK3S+	Надійність та довговічність, вбудовані датчики філаменту, обриву й блокування, якісна підтримка та оновлення прошивки.	Вища вартість, складніша збірка.
MakerBot Replicator+	Простий Plug-and-Play дизайн, інтегроване програмне забезпечення MakerBot Print, надійна підтримка для шкіл і корпорацій.	Обмежена підтримка сторонніх матеріалів, більш закрита система, витратні матеріали коштують дорожче.

**Висновок:** 3D-принтери є ключовим інструментом сучасного прототипування, виробництва та навчання, що забезпечує швидке й точне створення фізичних об'єктів з цифрових моделей. Завдяки широкому вибору моделей — від доступних JGMaker і Ender 3 до професійних Prusa i3 MK3S+ та Ultimaker S5 — технологія адаптується до різних потреб користувачів: від домашніх майстерень до промислових лабораторій.

#### 1.4. Вибір віртуального симулятора і 3д принтера

Для реалізації віртуального симулятора роботи 3D-принтера ми обрали

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

середовище Unity та модель JGMaker Magic, оскільки їхні можливості й особливості ідеально доповнюють одне одного. Unity, завдяки вбудованому рушію PhysX і потужним засобам рендерингу на базі OpenGL/DirectX, достовірно відтворює динаміку розплавленого філаменту, колізії екструдера з платформою та інші критичні етапи FDM-друку. Гнучкість скриптингу на C# дозволяє створювати адаптивні алгоритми контролю температури, швидкості подачі матеріалу й руху каретки, а модульна архітектура середовища спрощує ізоляцію та тестування окремих компонентів симулятора. Завдяки підтримці експорту під Windows, macOS, Linux і WebGL, наш симулятор охоплює широку аудиторію — від студентів і викладачів до віддалених інженерів та хобістів.

JGMaker Magic був обраний через свою відкриту конструкцію, популярність серед початківців і невеликих майстерень, а також роботу на прошивці Marlin, що забезпечує прямий доступ до G-коду та налаштувань. Чітко задокументовані параметри екструдера, платформи й механіки руху дають змогу інтегрувати реальні команди друку в симулятор, зберігаючи точність відтворення. Простота конструкції полегшує моделювання віртуальних компонентів, а численні апгрейди — автонівелювання з BLTouch, тихі драйвери TMC2208 чи підсилений алюмінієвий каркас — легко відтворювати в Unity, щоб користувач міг «приміряти» їх перед фізичною покупкою.

Ми реалізували інтуїтивний інтерфейс із панеллю налаштувань, що дозволяє в реальному часі коригувати температуру хотенду, швидкість екструзії та висоту шару й одразу бачити вплив цих змін на якість друку. Unity UI Toolkit та елементи з Asset Store забезпечили єдину стилістику та скоротили час розробки. Система логування ключових показників — температура, швидкість руху, лінійна подача філаменту — автоматично зберігає дані в JSON-файлах і відображає їх у вигляді графіків, що дозволяє детально аналізувати ефективність процесу та виявляти закономірності оптимізації.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Особливу увагу приділено мережевому режиму: завдяки легкому серверу на базі Unity Transport кілька користувачів можуть одночасно працювати в одній віртуальній лабораторії, обмінюватися налаштуваннями та спостерігати результати «друку» колег у режимі реального часу. Це значно підсилює навчальний ефект у віддалених курсах і спільних проєктах.

Нарешті, наш симулятор закладає можливість інтеграції з VR- і AR-пристроями (Oculus, HoloLens), що дозволяє зануритися в простір принтера, перевірити правильність калібрування вручну чи детально інспектувати надрукований шар у натуральній величині.

Таким чином, поєднання Unity та JGMaker Magic гарантує високий рівень реалістичності, гнучкість налаштувань та доступність, створюючи не лише інструмент для навчання і досліджень, а й потужну платформу для спільної розробки та випробування апгрейдів перед їх фізичною реалізацією.

### **1.5. Встановлення напрямку дослідження**

Отже, тема «Створення віртуального симулятора роботи 3д принтера» є вкрай актуальною в умовах стрімкої цифровізації виробництва, освіти та наукових досліджень. Технологія FDM-друку на JGMaker Magic знаходить застосування у швидкому прототипуванні, медицині, агросекторі, машинобудуванні та побутових рішеннях, проте для її ефективного використання потрібно добре засвоїти принципи роботи саме цієї моделі. Віртуальний симулятор дає змогу опанувати навички налаштування й експлуатації JGMaker Magic без значних витрат матеріалів і без ризику пошкодження справжнього обладнання, а також тестувати різні режими друку в безпечному середовищі.

Застосування сучасних засобів розробки, наприклад Unity, дозволяє створити інтерактивну візуалізацію процесу друку на JGMaker Magic у реальному часі: від спостереження за роботою екструдера до аналізу помилок, регулювання температурних режимів і швидкості подачі матеріалу.

					Арк.
					18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Такі рішення особливо корисні для студентів інженерних та агрономічних спеціальностей, дизайнерів і дослідників у сфері цифрового виробництва.

Об'єкт дослідження — процес створення програмного симулятора роботи JGMaker Magic з урахуванням його механіки, основних вузлів та послідовності шарового нанесення матеріалу.

Мета роботи — розробити віртуальний симулятор JGMaker Magic, що забезпечить користувачам можливість безпечного й зручного відпрацювання практичних навичок, а також точну візуалізацію техпроцесу.

Для реалізації поставленої мети необхідно:

- провести огляд існуючих віртуальних симуляторів FDM-друку та проаналізувати їх функціонал;
- спроектувати архітектуру та інтерфейс симулятора саме для JGMaker Magic з використанням Unity;
- змодельовати базові кінематичні властивості друку на JGMaker Magic й поведінку матеріалу;
- забезпечити відображення типових помилок друку та різних сценаріїв роботи JGMaker Magic;
- виконати тестування симулятора в різних умовах та оптимізувати його параметри.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

## РОЗДІЛ 2. СТВОРЕННЯ ВІРТУАЛЬНОГО СИМУЛЯТОРА

### 2.1. Створення середовища симулятора

У рамках кваліфікаційної роботи була реалізована програмна частина віртуального симулятора для навчання управлінню 3D принтером. Основна мета проєкту — забезпечити можливість безпечного та ефективного відпрацювання навичок роботи з сучасним обладнанням у віртуальному середовищі, що відображає характерні умови лабораторного використання.

Для оптимізації процесу розробки було використано готове 3D-середовище, завантажене з платформи Sketchfab (рис.2.1, 2.2, 2.3, 2.4). Зокрема, взято середовище «Хімічна лабораторія» із подальшою адаптацією: центральні столи були прибрані, а також до оточення додано необхідні елементи для моделювання 3D принтера (рис.2.5, 2.6, 2.7, 2.8). Це дозволило зосередитися на розробці функціональної логіки симулятора без необхідності створення всіх візуальних компонентів з нуля.



Рис.2.1. Початковий вигляд кімнати

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Яковлева А.			РОЗДІЛ 2. СТВОРЕННЯ ВІРТУАЛЬНОГО СИМУЛЯТОРА	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Несвідомін А.					20	
Н. Контр.						НУБіП України		
Затверд.								



Рис.2.2. Фронтальний вигляд



Рис. 2.3. Профільний вигляд

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21



Рис.2.4. Горизонтальний вигляд



Рис.2.5. Адаптований вигляд кімнати

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22



Рис.2.6. Фронтальний вигляд



Рис.2.7. Профільний вигляд

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23



Рис.2.8. Горизонтальний вигляд

Як платформу для реалізації проєкту було обрано Unity завдяки її високій гнучкості, потужним інструментам для роботи з фізикою та 3D-графікою, а також широким можливостям для кросплатформенної розробки. Популярність Unity у спільноті розробників та наявність численних ресурсів для самонавчання стали додатковими чинниками, що обґрунтовують її вибір.

Розробка симулятора включала інтеграцію високоякісної 3D-моделі принтера (рис.2.9, 2.10, 2.11, 2.12) до адаптованого середовища, а також реалізацію базових функцій управління пристроєм. Особлива увага приділялася створенню реалістичного відтворення процесу друку, включно з моделюванням руху механізмів, відображенням параметрів процесу друку (наприклад, температура екструдера, швидкість подачі філаменту та рівень заповнення), а також елементами взаємодії користувача з симулятором. Інтерфейс користувача був адаптований для навчального процесу, що дозволяє легко відслідковувати основні показники роботи 3D принтера у режимі реального часу.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

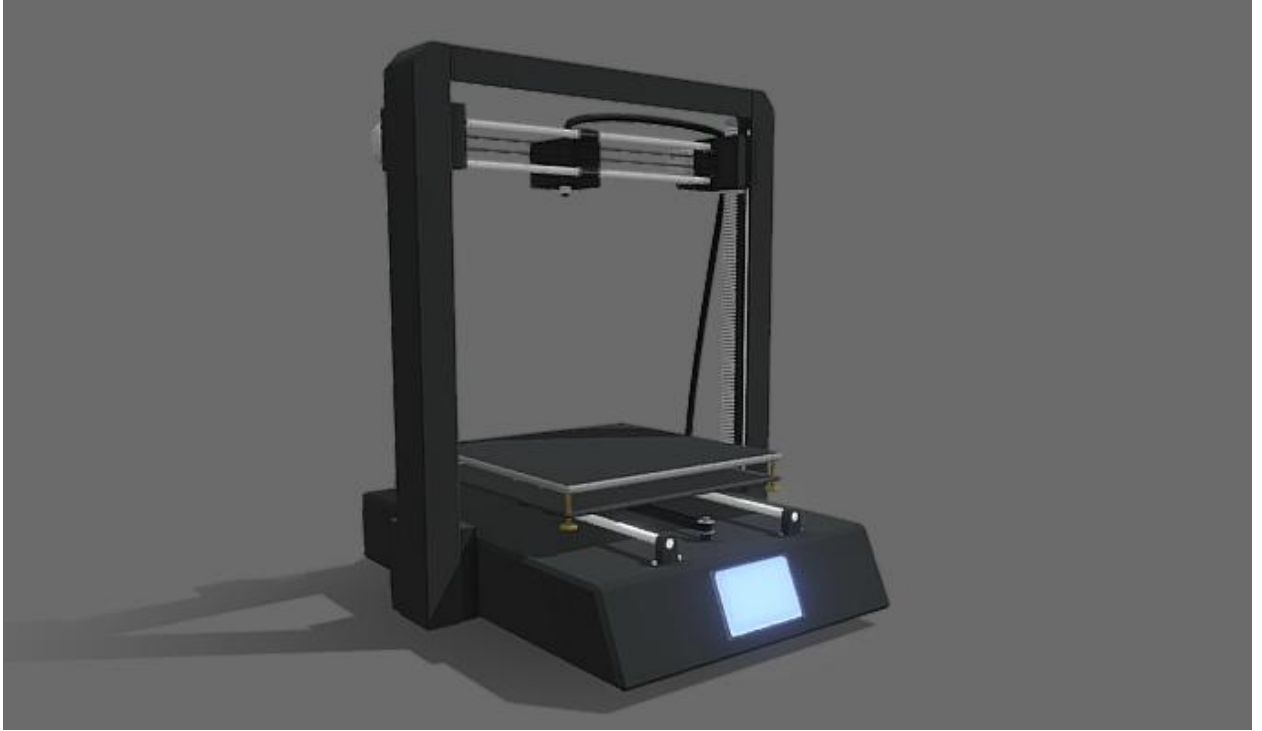


Рис. 2.9. 3Д принтер

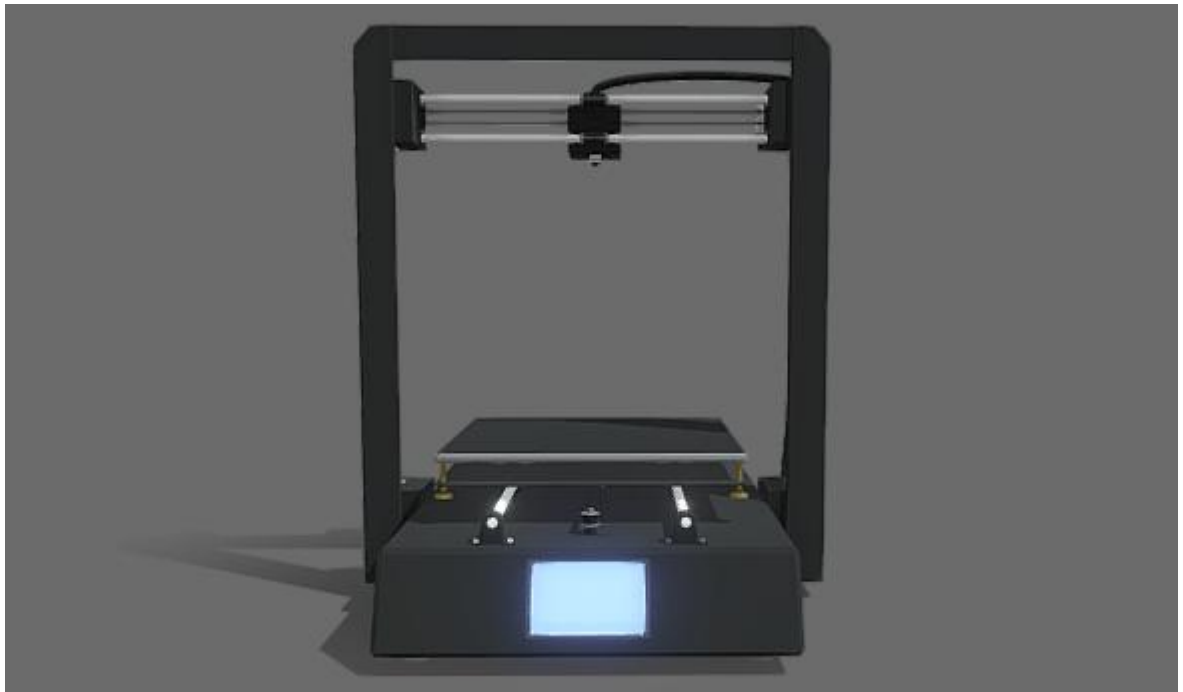


Рис.2.10. Фронтальний вигляд

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25



Рис.2.11. Профільний вигляд

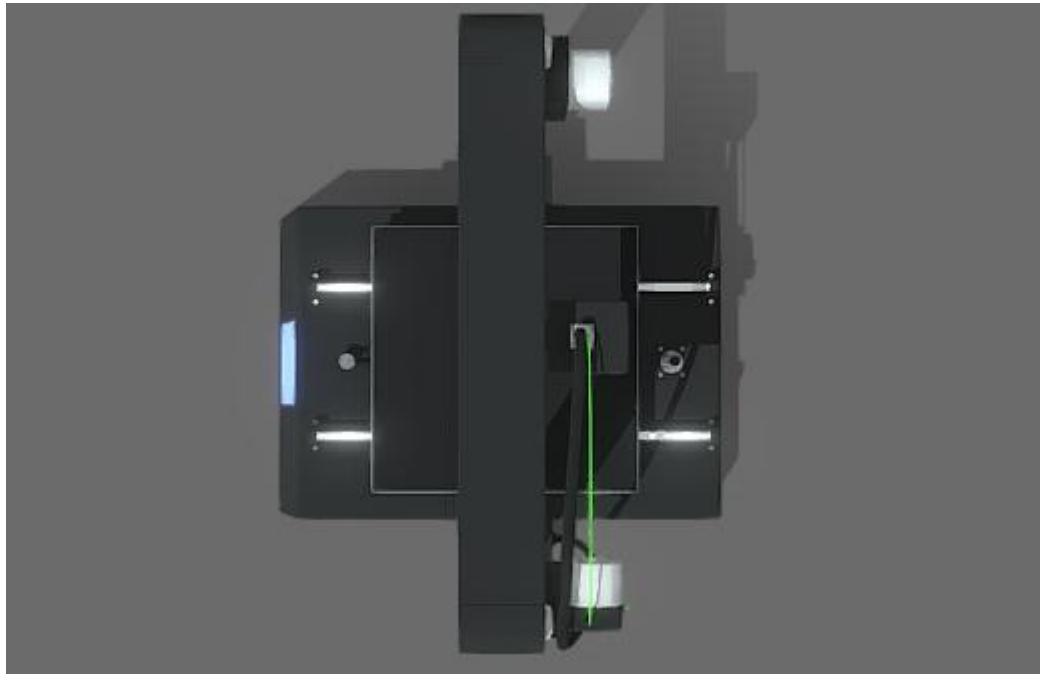


Рис.2.12. Горизонтальний вигляд

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Unity забезпечує можливість точного моделювання фізичних процесів, включно з динамікою руху механічних компонентів та взаємодією з навколишнім середовищем. Ці аспекти були використані для симуляції роботи принтера в різних сценаріях: від базових операцій друку до складних тренувальних модулів, що імітують специфічні лабораторні умови. З метою забезпечення повного занурення у процес додано підтримку VR та AR, що дозволяє використовувати симулятор як з традиційним екраном, так і з обладнанням віртуальної реальності.

Таким чином, використання Unity у поєднанні з готовими ресурсами Sketchfab дозволило ефективно реалізувати навчальний симулятор для роботи 3D принтера, який може стати основою для подальших досліджень, розширень і практичного впровадження в системах підготовки операторів сучасного лабораторного обладнання.

## 2.2. Налаштування інтерфейсу симулятора

У процесі розробки віртуального симулятора роботи 3D-принтера JGMaker Magic особливу увагу було приділено налаштуванню інтерфейсу, який би забезпечував інтуїтивну, точну та реалістичну взаємодію користувача з віртуальними компонентами обладнання. Одним із ключових елементів такого інтерфейсу стала технологія Snap Zone, реалізована в середовищі Unity.

Snap Zone — це спеціально визначені області у віртуальному просторі, які автоматично вирівнюють і фіксують об'єкти під час їхнього наближення. Іншими словами, коли користувач переміщує деталь або інструмент до певної частини 3D-принтера, система «підтягує» його до правильного положення, імітуючи фізичне приєднання або монтаж. Цей механізм суттєво підвищує точність взаємодії з моделлю та знижує ймовірність помилок під час симуляції.

*Інтеграція Snap Zone у симуляторі дозволила реалізувати такі функції:*

					Арк.
					27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ

- Візуалізація зон взаємодії (рис.2.13) — кожна зона має чітке графічне відображення (підсвічування, контур або зміна прозорості), що сигналізує користувачу про можливість «причепити» елемент у цьому місці.

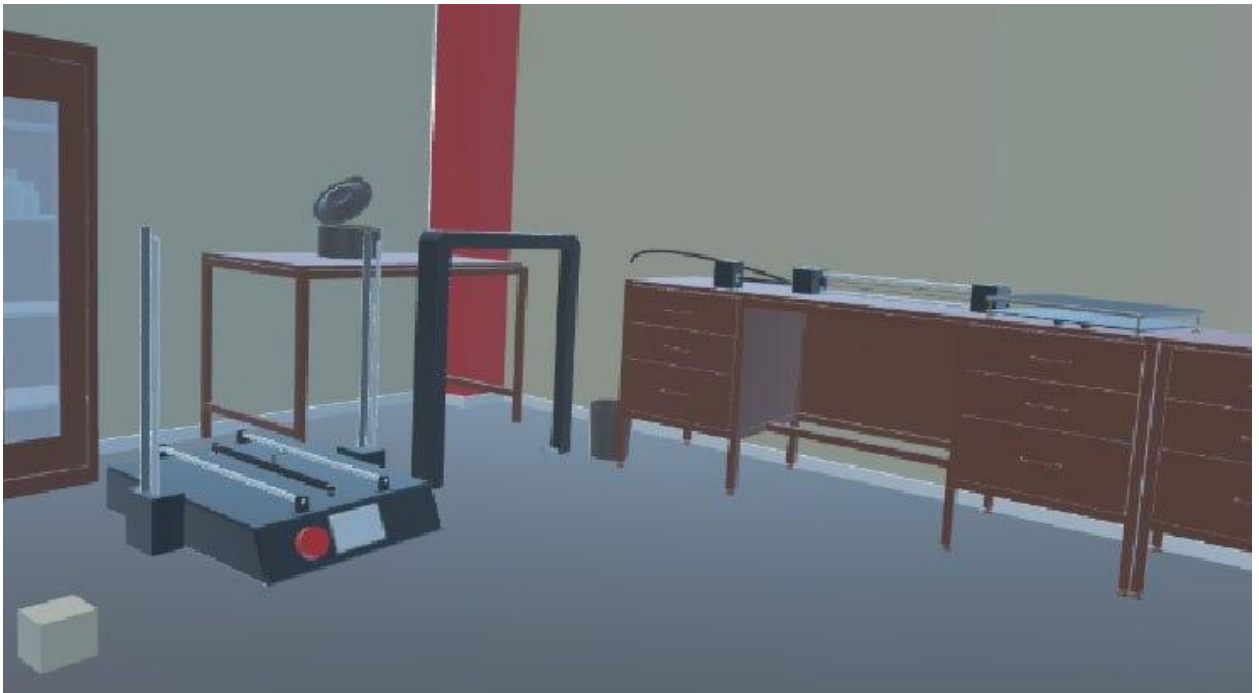


Рис.2.13. Розібраний 3Д принтер

- Автоматичне вирівнювання — за допомогою фізичних тригерів(рис.2.14-17) і скриптів на C# (рис.2.18, 2.19), система визначає, коли об'єкт входить у межі Snap Zone, і вирівнює його за заданими координатами та орієнтацією, забезпечуючи коректне з'єднання деталей.

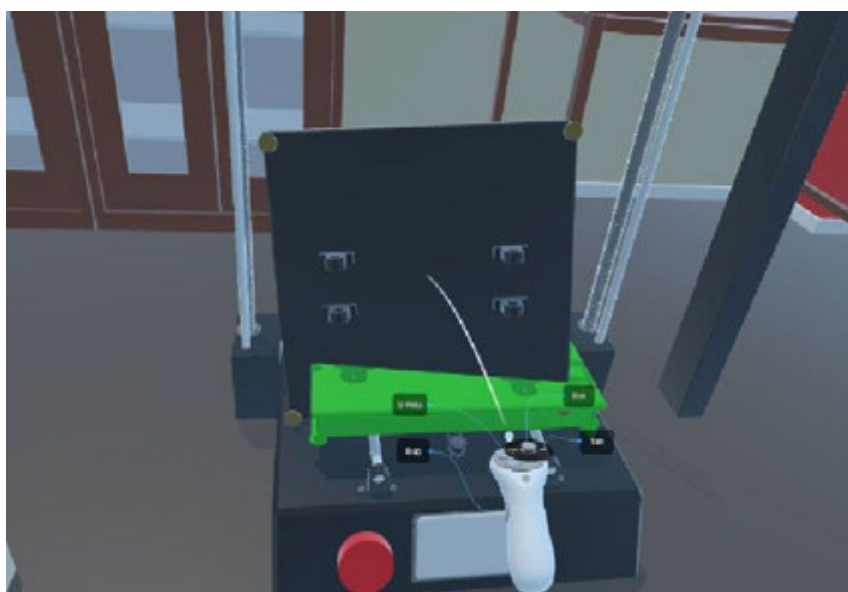


Рис.2.14. Вирівнювання друкованої платформи (стіл)

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

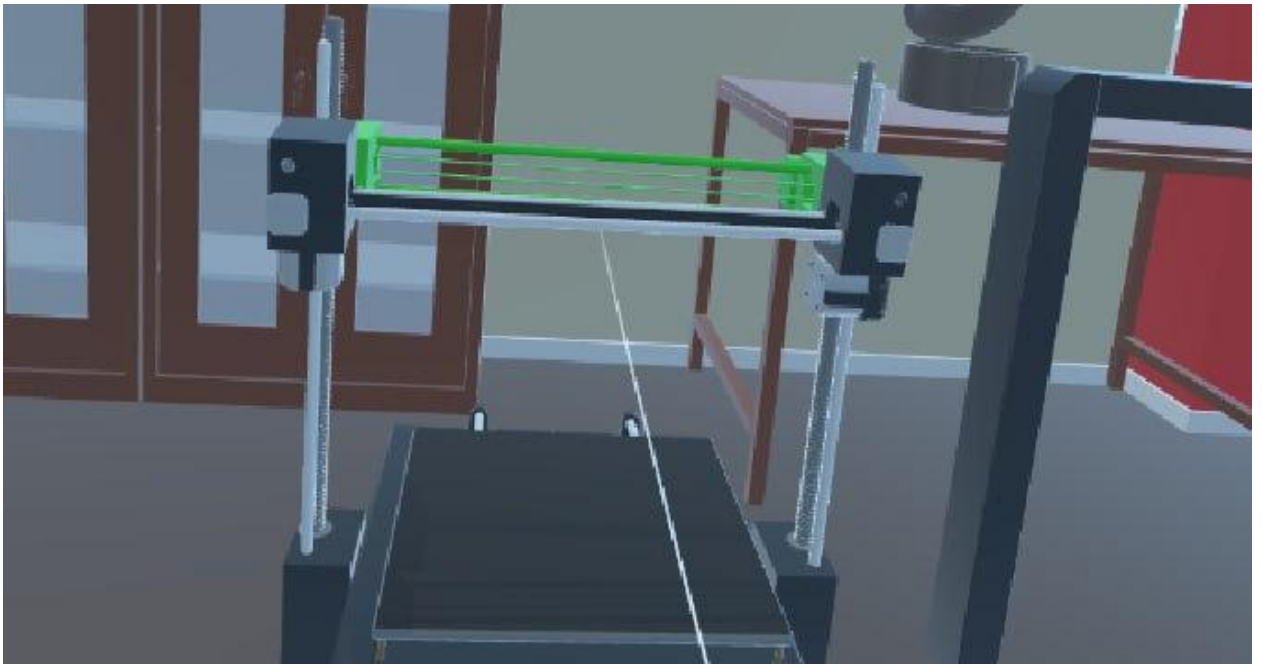


Рис.2.15. Вирівнювання механізму піднімання

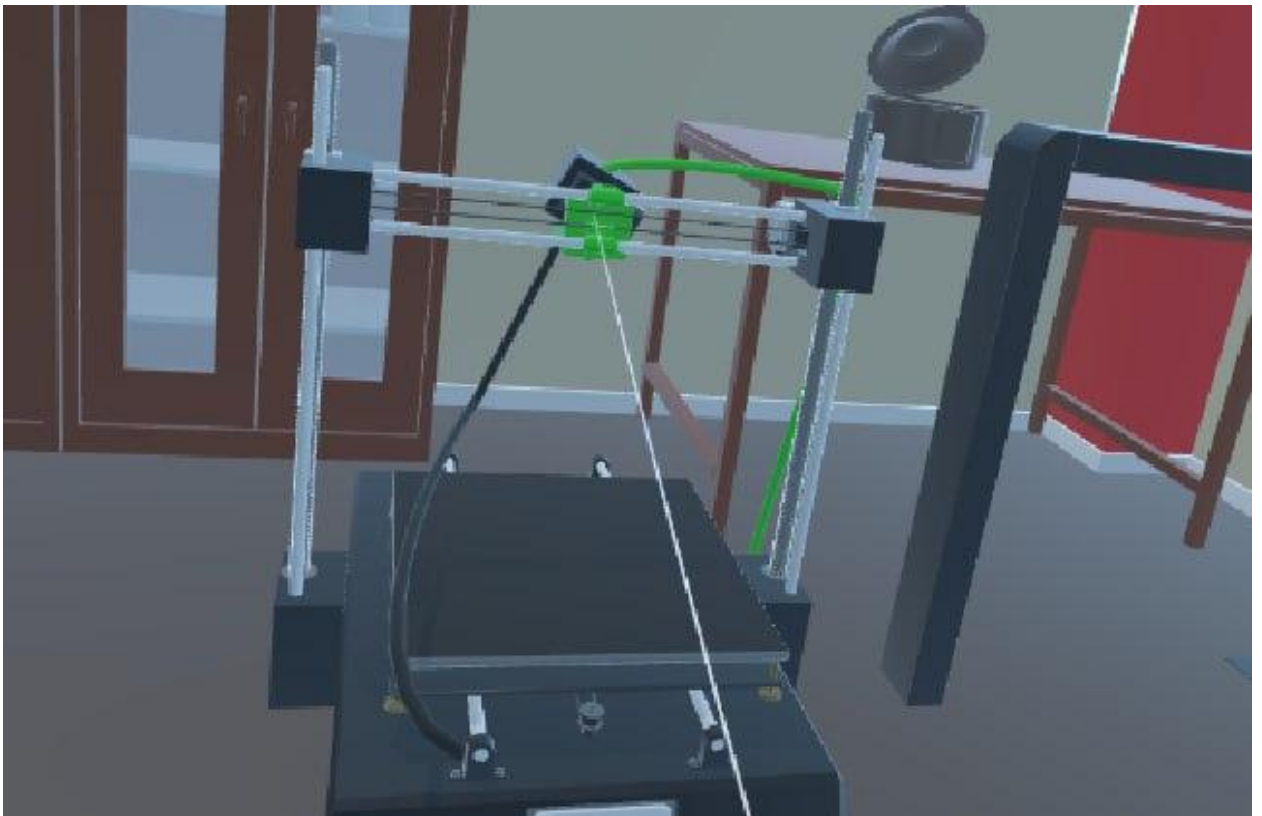


Рис.2.16. Вирівнювання екструдера

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

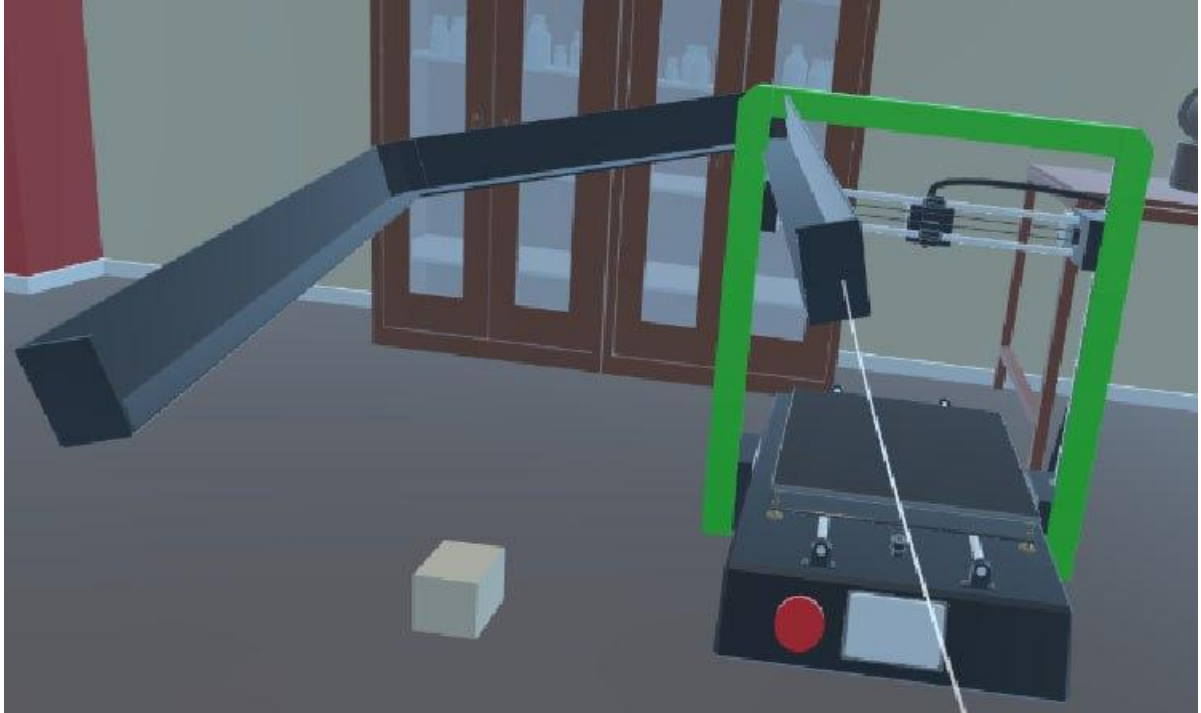


Рис.2.17. Вирівнювання рами

```

using System;
using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine.CoreUtils.Collections;
using UnityEngine.Rendering;
using UnityEngine.Scripting.APIUpdating;
using UnityEngine.XR.Interaction.Toolkit.Interactables;
using UnityEngine.XR.Interaction.Toolkit.Transformers;
using UnityEngine.XR.Interaction.Toolkit.Utilities;

namespace UnityEngine.XR.Interaction.Toolkit.Interactors
{
    /// <summary>
    /// Enum used to determine how the socket should scale the interactable.
    /// </summary>
    /// <seealso cref="XRSocketInteractor.socketScaleMode"/>
    [MovedFrom("UnityEngine.XR.Interaction.Toolkit")]
    public enum SocketScaleMode
    {
        /// <summary>
        /// The interactable will not be scaled when attached to the socket.
        /// </summary>
        None,

        /// <summary>
        /// The interactable will be scaled to a fixed size when attached to the socket.
        /// The actual size is defined by the <see cref="XRSocketInteractor.fixedScale"/> value.
        /// </summary>
        Fixed,

        /// <summary>
        /// The interactable will be scaled to fit the size of the socket when attached.
        /// The scaling is dynamic, computed using the interactable's bounds, with a target size defined by <see cref="XRSocketInteractor.targetBoundsSize"/>.
        /// </summary>
        StretchedToFitSize,
    }

    /// <summary>
    /// Interactor used for holding interactables via a socket.
    /// </summary>
}

```

Рис. 2.18. Код вирівнювання (початок)

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

```
Файл Редагувати Переглянути
m_interactablesWithSocketTransformer.Add(grabInteractable);
return true;
}

/// <summary>
/// Ends socket snapping for a specified <see cref="XGrabInteractable"/> object.
/// </summary>
/// <param name="grabInteractable">The <see cref="XGrabInteractable"/> object to end socket snapping for.</param>
/// <returns>Returns <see langword="true"/> if the specified grab interactable was found and removed; otherwise, <see langword="false"/>.</returns>
/// <remarks>
/// Removes the specified grab interactable from the local interactables with socket transformer list and removes it from the socket grab transformer.
/// </remarks>
/// </summary>
/// <seealso cref="StartSocketSnapping"/>
protected virtual bool EndSocketSnapping(XGrabInteractable grabInteractable)
{
    grabInteractable.RemoveingGrabTransformer(m_SocketGrabTransformer);
    return m_interactablesWithSocketTransformer.Remove(grabInteractable);
}

void SyncTransformerParams()
{
    m_SocketGrabTransformer.socketInteractor = this;
    m_SocketGrabTransformer.socketSnappingRadius = socketSnappingRadius;
    m_SocketGrabTransformer.scaleMode = socketScaleMode;
    m_SocketGrabTransformer.fixedScale = fixedScale;
    m_SocketGrabTransformer.targetBoundsSize = targetBoundsSize;
}

struct ShaderPropertyLookup
{
    public static readonly int surface = Shader.PropertyToID("Surface");
    public static readonly int mode = Shader.PropertyToID("Mode");
    public static readonly int srcBlend = Shader.PropertyToID("SrcBlend");
    public static readonly int dstBlend = Shader.PropertyToID("DstBlend");
    public static readonly int write = Shader.PropertyToID("Write");
    public static readonly int baseColor = Shader.PropertyToID("BaseColor");
    public static readonly int color = Shader.PropertyToID("Color"); // legacy
}
}
}

Page 1, Line 101, 1775 columns 100% (line 51) (line 4)
```

Рис.2.19. Код вирівнювання (Кінець)

- Контроль точності (рис.2.20) — реалізовано обмеження, що дозволяють встановлювати у відповідну зону лише певні типи об'єктів. У разі невірної деталі зона не активується, тим самим запобігаючи помилковій взаємодії.

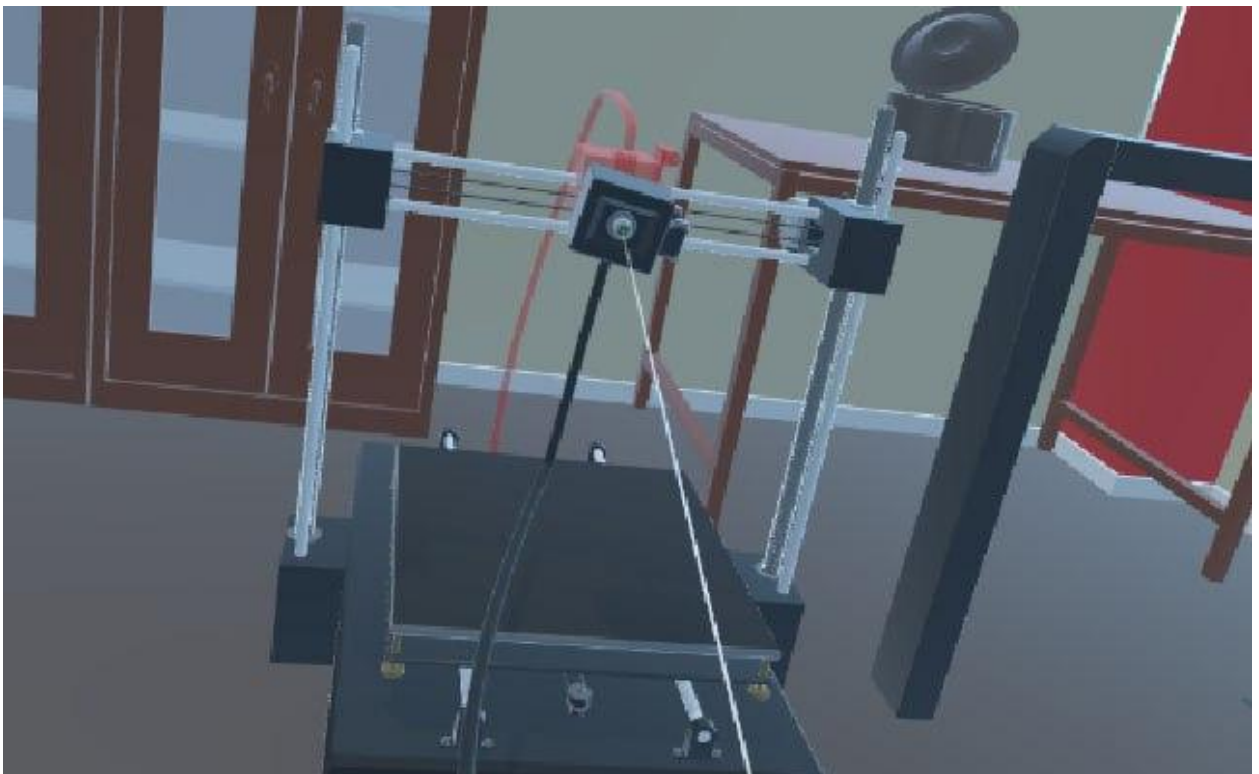


Рис.2.20. Не приймає положення

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

- Зворотний зв'язок (рис.2.21, 2.22) — користувач отримує візуальні або звукові сигнали після успішного розміщення елемента, що створює більш інтуїтивно зрозумілий досвід використання.

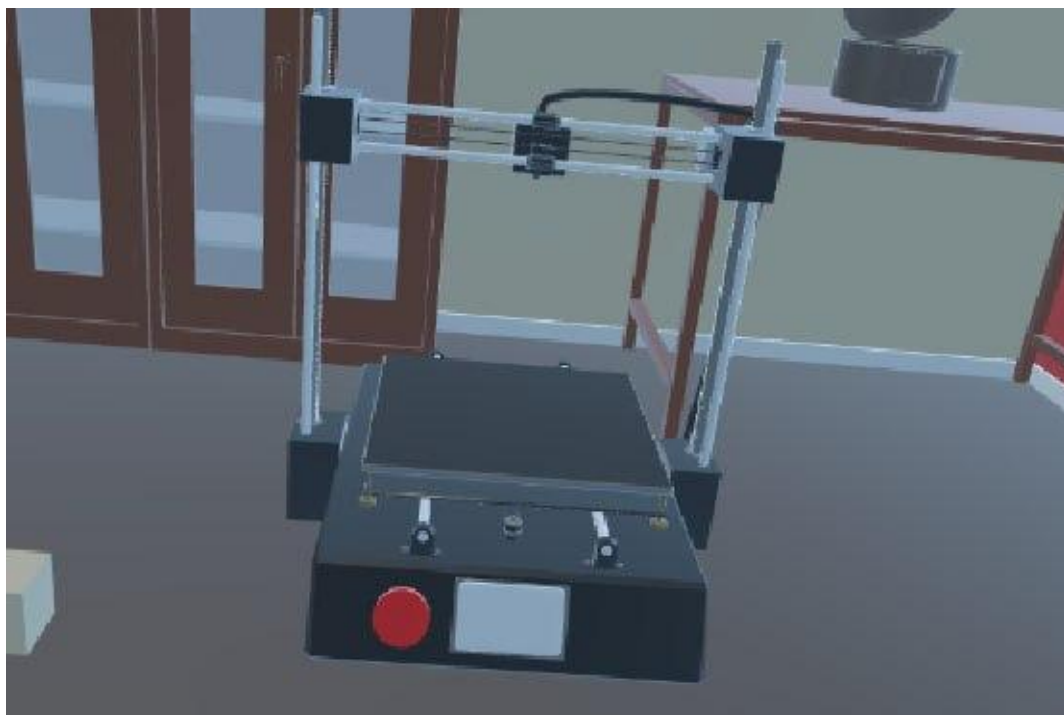


Рис.2.21. Принтер не готовий до роботи (світиться червоним)

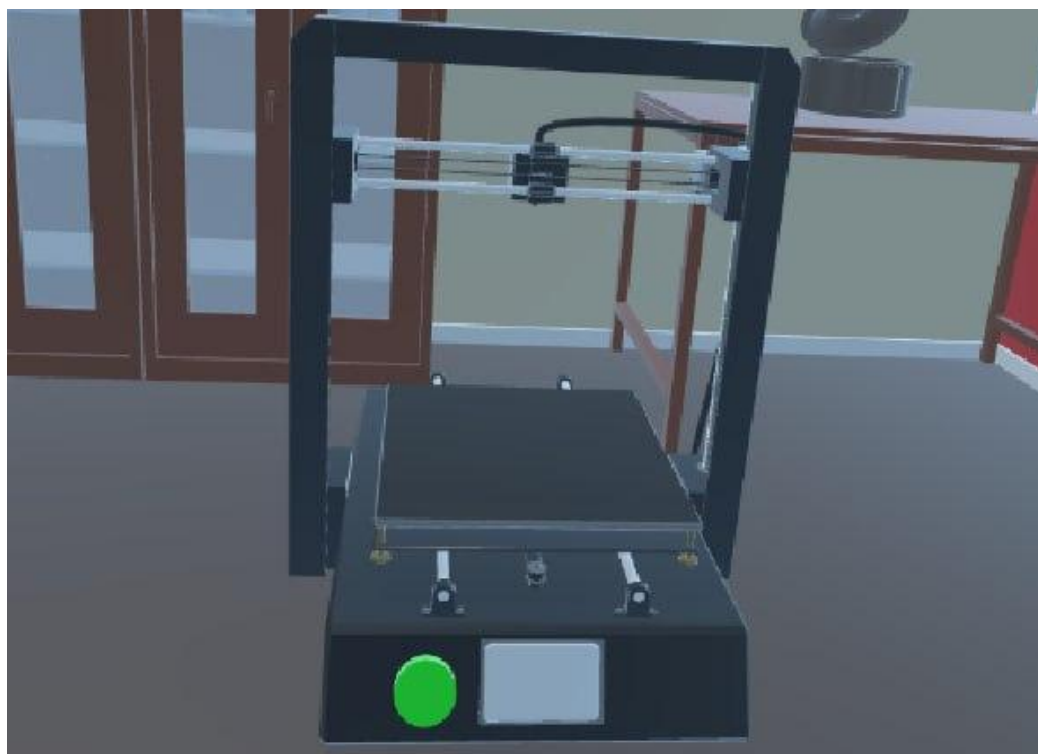


Рис.2.22. Принтер готовий до друку (світиться зеленим)

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Використання Snap Zone у цьому проєкті відіграло важливу роль у досягненні високого рівня реалізму. Наприклад, при складанні чи зміні положення екструдера, платформи або кріплень користувач має можливість точно позиціонувати елементи, як це відбувається у справжньому принтері. Це наближає симулятор до умов реального використання й покращує навчальний ефект.

Технологія була реалізована за допомогою наявних інструментів середовища Unity із можливим використанням зовнішніх SDK (таких як VRTK або Tilia), які дозволяють створювати інтерактивні зони прив'язки. У рамках цього симулятора Snap Zone була адаптована під потреби 3D-принтера JGMaker Magic, забезпечуючи точне моделювання типових дій користувача при взаємодії з його компонентами.

Таким чином, впровадження Snap Zone стало важливою складовою налаштування інтерфейсу симулятора, оскільки значно покращило точність розміщення елементів, зменшило ризик помилок та зробило взаємодію з симулятором доступною навіть для початківців.

### 2.3. Налаштування 3D принтера

Для досягнення реалістичності та інтерактивності в роботі віртуального симулятора було виконано детальне налаштування 3D-принтера JGMaker Magic у середовищі Unity. Цей процес включав підготовку моделі, визначення фізичних та функціональних характеристик основних компонентів, а також реалізацію інтерфейсу керування параметрами друку.

#### *Імпорт та структуризація моделі*

Перед початком налаштування була імпортована високоякісна 3D-модель принтера JGMaker Magic, розділена на окремі функціональні елементи — корпус, екструдер, платформа, осі переміщення та додаткові механізми (рис.2.23). Для зручності взаємодії у середовищі Unity було створено відповідну ієрархію об'єктів, розміщену в окремих підкаталогах.

					Арк.
					33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ



Рис.2.23. Розібраний 3д принтер

Особливу увагу приділено налаштуванню матеріалів і текстур: використано шейдери з підтримкою блиску, прозорості та коректного відображення світла для реалістичної візуалізації металевих, пластикових та скляних поверхонь.

#### *Поведінка компонентів та Snap Zone*

Однією з ключових технологій, що значно полегшує взаємодію користувача з віртуальним обладнанням, стала система Snap Zone. Вона дозволяє точно позиціонувати об'єкти в межах заданих зон прив'язки. Наприклад, при переміщенні екструдера або встановленні платформи, елементи автоматично вирівнюються та «приціплюються» до визначеного положення, імітуючи реальні процеси монтажу.

Для реалізації цієї логіки було додано колайдери та тригери, які відстежують входження об'єкта в межі Snap Zone та активують візуальні сигнали — підсвічування, контури або анімаційні ефекти, що підтверджують коректне розміщення.

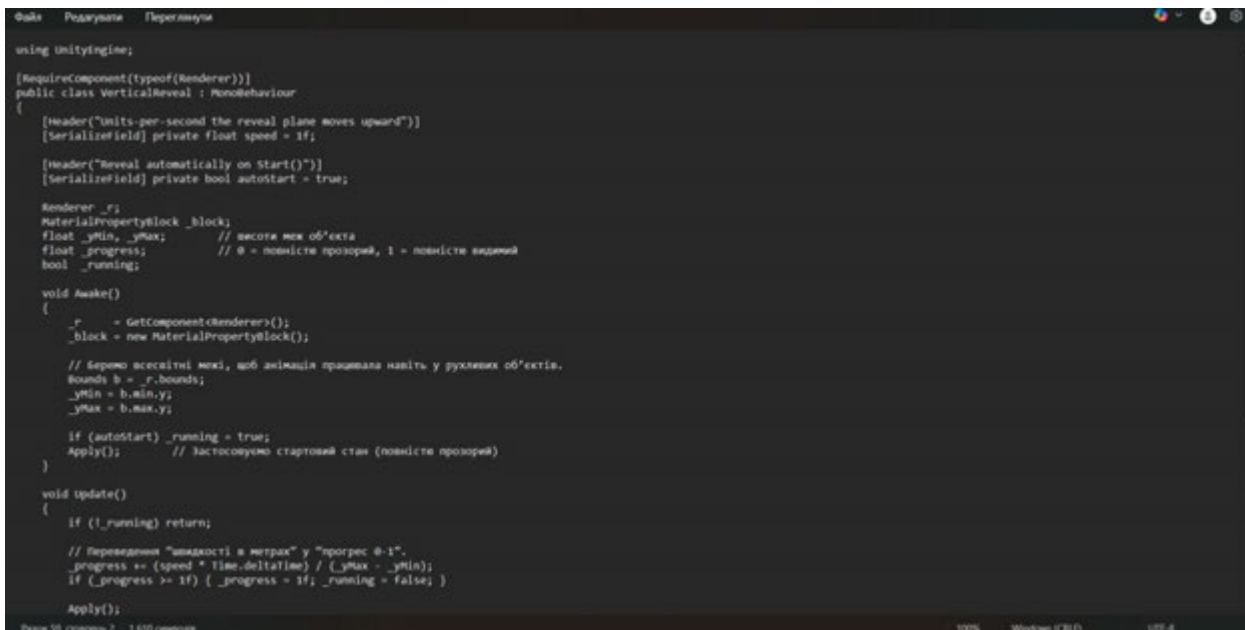
#### *Параметри друку*

У межах симуляції також реалізовано віртуальне керування основними

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

параметрами 3D-друку (рис.2.24, 2.25):

- Температура екструдера — налаштовується за допомогою слайдера, що впливає на візуалізацію процесу плавлення філаменту.
- Швидкість друку та час формування шару — ці параметри дозволяють моделювати швидкість руху головки та подачі матеріалу.
- Висота шарів — змінюється користувачем для демонстрації впливу на точність та якість моделі.



```
using UnityEngine;

[RequireComponent(typeof(Renderer))]
public class VerticalReveal : MonoBehaviour
{
    [Header("Units-per-second the reveal plane moves upward")]
    [SerializeField] private float speed = 1f;

    [Header("Reveal automatically on Start()")]
    [SerializeField] private bool autoStart = true;

    Renderer _r;
    MaterialPropertyBlock _block;
    float _yMin, _yMax; // висота меж об'єкта
    float _progress; // 0 - повністю прозорий, 1 - повністю видимої
    bool _running;

    void Awake()
    {
        _r = GetComponent<Renderer>();
        _block = new MaterialPropertyBlock();

        // беремо осьові межі, щоб анімація працювала навіть у рухомих об'єктах.
        Bounds b = _r.bounds;
        _yMin = b.min.y;
        _yMax = b.max.y;

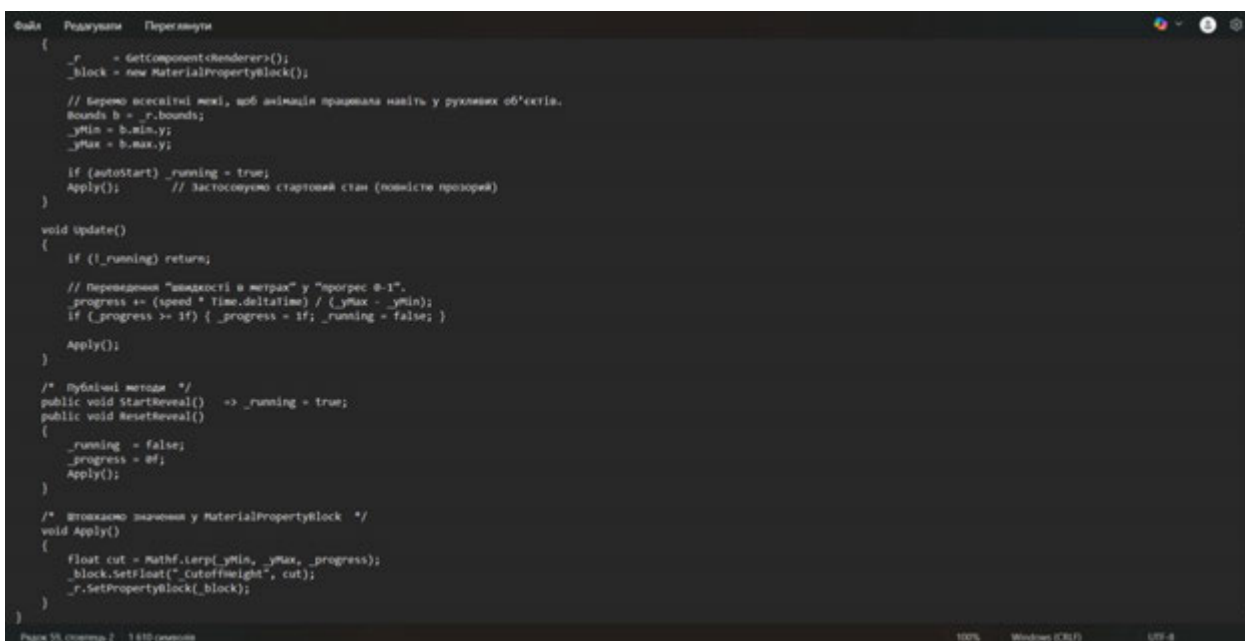
        if (autoStart) _running = true;
        Apply(); // застосовуємо стартовий стан (повністю прозорий)
    }

    void Update()
    {
        if (!_running) return;

        // Переведення "швидкості в метрах" у "прогрес 0-1".
        _progress += (speed * Time.deltaTime) / (_yMax - _yMin);
        if (_progress >= 1f) { _progress = 1f; _running = false; }

        Apply();
    }
}
```

Рис.2.24. Перша частина коду друку



```
{
    _r = GetComponent<Renderer>();
    _block = new MaterialPropertyBlock();

    // беремо осьові межі, щоб анімація працювала навіть у рухомих об'єктах.
    Bounds b = _r.bounds;
    _yMin = b.min.y;
    _yMax = b.max.y;

    if (autoStart) _running = true;
    Apply(); // застосовуємо стартовий стан (повністю прозорий)
}

void Update()
{
    if (!_running) return;

    // Переведення "швидкості в метрах" у "прогрес 0-1".
    _progress += (speed * Time.deltaTime) / (_yMax - _yMin);
    if (_progress >= 1f) { _progress = 1f; _running = false; }

    Apply();
}

/* Публічні методи */
public void StartReveal() => _running = true;
public void ResetReveal()
{
    _running = false;
    _progress = 0f;
    Apply();
}

/* Виводимо значення у MaterialPropertyBlock */
void Apply()
{
    float cut = Mathf.Lerp(_yMin, _yMax, _progress);
    _block.SetFloat("CutoffHeight", cut);
    _r.SetPropertyBlock(_block);
}
}
```

Рис.2.25. Друга частина коду друку

					Арк.
					35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	
					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ

Усі параметри інтегровані до користувацького інтерфейсу й відображаються у вигляді керованих елементів: кнопок, повзунків, інформаційних панелей тощо (рис.2.26).



Рис.2.26. Кнопка + панель

#### *Анімація та зворотний зв'язок*

Для забезпечення зручності та наочності взаємодії реалізовано систему зворотного зв'язку. При правильному розміщенні компонентів активуються ефекти — зокрема, світлова індикація, звук чи текстові повідомлення, що сигналізують про успішне виконання дії. У випадках помилок (наприклад, коли задана температура виходить за допустимі межі) система інформує користувача відповідним попередженням.

#### *Технічна реалізація в Unity*

Налаштування симулятора здійснювалося за допомогою стандартного інструментарію Unity:

- Скрипти на C# — реалізують логіку Snap Zone, оновлення параметрів друку та взаємодію з користувачем у реальному часі.
- UI-елементи — побудовані на базі Canvas: містять слайдери, кнопки, індикатори, текстові поля.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

- Фізичні компоненти — використання Rigidbody, Collider та Trigger дозволило змодельовати точну взаємодію між віртуальними елементами.

Завдяки комплексному підходу до налаштування принтера в Unity вдалося створити функціональне, наочне та навчально-орієнтоване середовище, що дає змогу користувачам детально ознайомитися з принципами роботи 3D-принтера JGMaker Magic та безпечно відпрацювати ключові дії в умовах симуляції.

#### **2.4. Процес роботи 3D принтера**

Після повного складання 3D-принтера JGMaker Magic у віртуальному симуляторі та за умови, що всі компоненти встановлено коректно, без помилок у конфігурації, запускається повноцінний процес друку.

Усі механічні вузли – платформа, екструдер, напрямні осі – готові до роботи, а користувач має доступ до налаштувань параметрів друку через інтерфейс. Після активації друку виконується початкове калібрування: екструдер переміщується до «домашнього положення» (home position) для визначення початкових координат. Це дозволяє системі точно зорієнтуватися у просторі робочої зони.

Далі починається розігрів екструдера до заданої температури. Після досягнення необхідного температурного режиму активується подача філаменту — пластику, з якого формується модель. Екструдер починає рухатися згідно з G-кодом (або відповідним алгоритмом у симуляторі), відкладаючи розплавлений матеріал шар за шаром на поверхню платформи. Одночасно платформа може опускатися (у випадку осі Z) або залишатися нерухомою — залежно від типу конструкції принтера (рис.2.27).

У ході друку користувач у симуляторі може спостерігати за рухом головки, контролювати температуру, швидкість, рівень заповнення та інші параметри, що змодельовані у вигляді інтерактивних панелей. У разі

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

виникнення умовних відхилень (наприклад, якщо температура зміниться за межі допустимого діапазону), система подає сигнал або блокує процес до усунення причини (рис.2.28).



Рис.2.27. Процес розігрівання

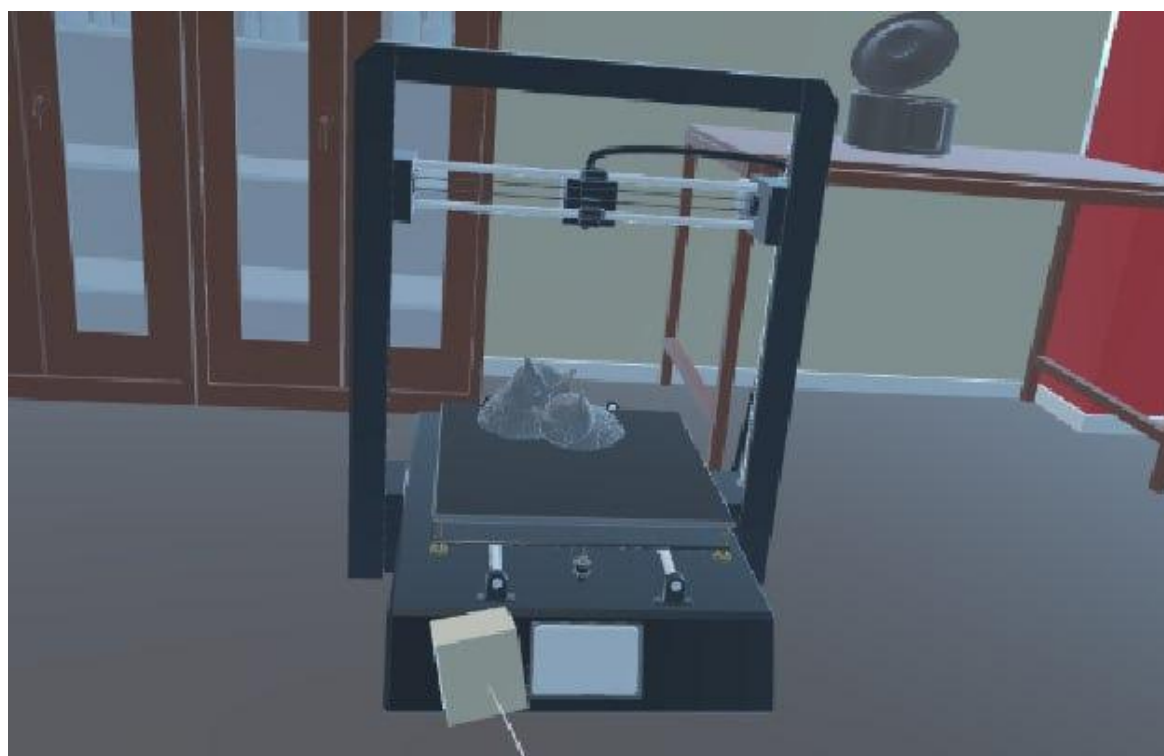


Рис.2.28. Процес друку

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Якщо жодних помилок не виявлено, друк продовжується згідно з заданими параметрами до завершення всіх шарів моделі. Після завершення останнього шару екструдер автоматично повертається в початкову позицію, а система інформує користувача про успішне завершення процесу (рис.2.29). У реальному житті після цього модель охолоджується, але у симуляторі цей етап можна умовно візуалізувати або завершити, залежно від навчальних цілей.

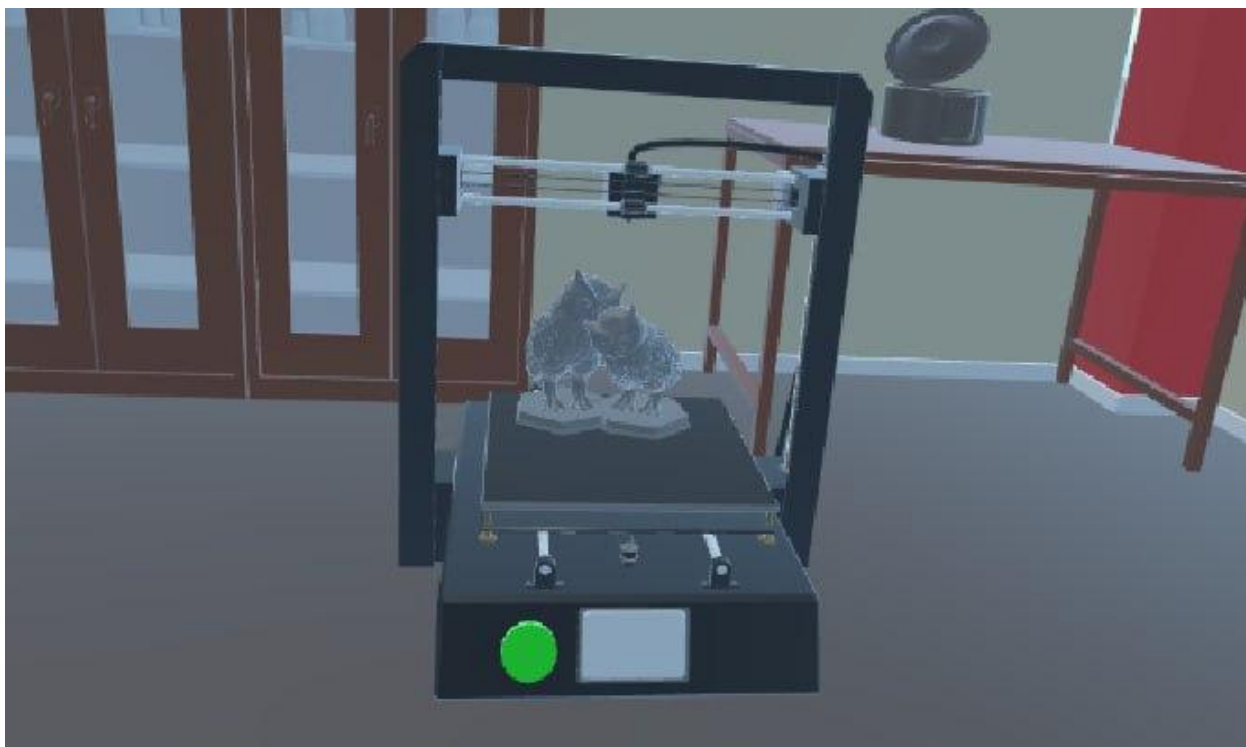


Рис.2.29. Завершений процес

Таким чином, симулятор дозволяє точно відтворити основні етапи роботи 3D-принтера — від підготовки до запуску й завершення друку, забезпечуючи користувача реалістичним досвідом у безпечному та контрольованому середовищі.

## 2.5. Інтерфейс користувача

Розробка інтерфейсу користувача (UI) та системи взаємодії у симуляторі 3D-принтера JGMaker Magic в середовищі Unity відіграла

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

вирішальну роль у створенні повноцінного навчального інструменту. Саме через інтерфейс здійснюється основна комунікація між користувачем і симулятором, тому його зручність, зрозумілість та функціональність мають безпосередній вплив на якість опанування процесу 3D-друку. Особлива увага була приділена тому, щоб усі елементи UI були логічно структуровані, інтуїтивно зрозумілі та доступні навіть для користувачів без досвіду у сфері 3D-моделювання чи друку.

### *1. Побудова інтерфейсу моніторингу процесу друку*

В інтерфейсі були реалізовані основні параметри, які користувач може контролювати під час віртуального друку. Серед них — температура екструдера, швидкість друку, висота шару, стан платформи та поточна стадія побудови моделі. Інформація подається у структурованому вигляді через слайдери, цифрові індикатори та кнопки, які розміщені в окремому UI-панелі, що не перекриває огляд принтера.

Інтерфейс розроблено так, щоб він був інтуїтивно зрозумілим навіть для користувача без досвіду роботи з 3D-друком, а також гнучким — для більш просунутих сценаріїв взаємодії.

### *2. Система взаємодії через Snap Zone*

Одним із найбільш ефективних засобів управління у симуляторі стала система Snap Zone, що дозволяє точно позиціонувати деталі та елементи принтера у визначені місця. Наприклад, при складанні принтера або встановленні змінних модулів користувач може просто наблизити об'єкт до активної зони, і він автоматично вирівнюється та «прищипиться».

Такі механізми значно полегшують навчання і дозволяють уникнути критичних помилок, імітуючи точність складання у реальному житті.

### *3. Анімація, підказки та зворотний зв'язок*

Щоб взаємодія з симулятором була максимально інформативною та зрозумілою, було впроваджено анімовані підказки та сигнали зворотного зв'язку (рис.2.30). Наприклад, коли користувач правильно встановлює

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

КОМПОНЕНТ — зона підсвічується, чути характерний звук «фіксації» або відображається коротке повідомлення про успіх.

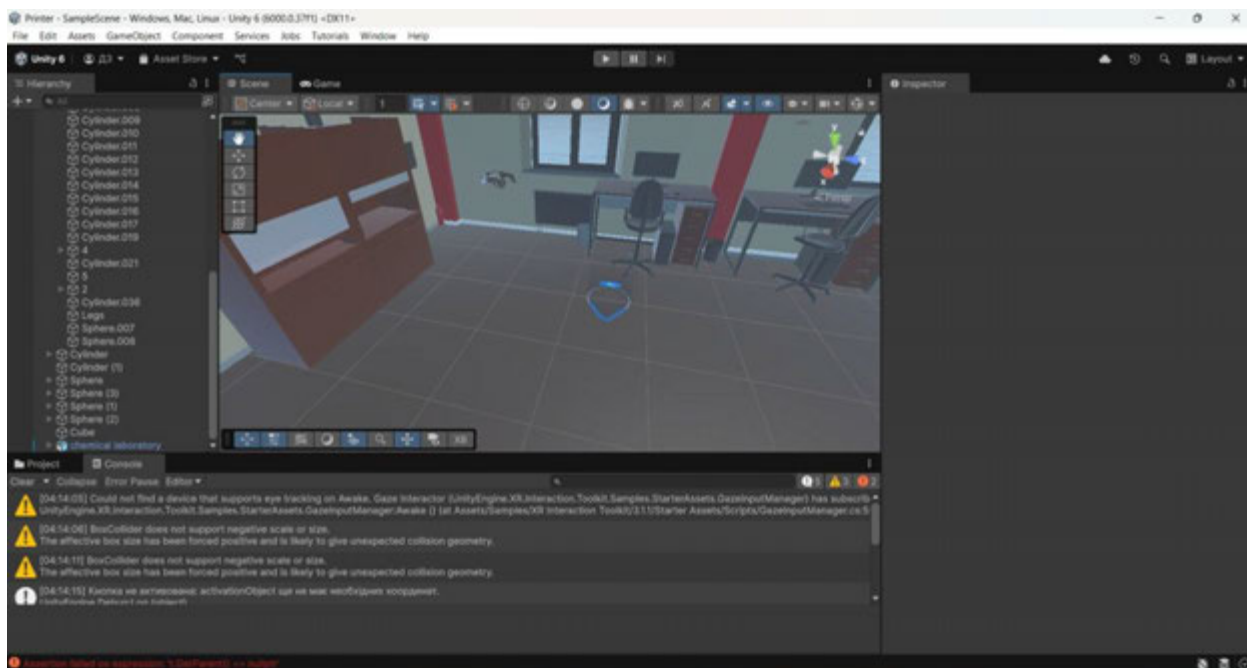


Рис.2.30. Підказки

#### 4. Керування параметрами друку

Для моделювання роботи 3D-принтера JGMaker Magic було реалізовано інтерактивне керування параметрами друку через UI:

- Температура екструдера — задається через слайдери або поля введення;
- Швидкість друку — регулюється в межах, що відображають вплив на якість;
- Висота шару — демонструє, як змінюється деталізація при зміні параметра;
- Стан друку — індикатор ходу побудови шару з візуалізацією процесу.

Кожна з цих функцій має свій елемент інтерфейсу та змінюється в реальному часі.

#### 5. Адаптація під VR/AR-сценарії

Оскільки проект може підтримувати VR-режим, інтерфейс було

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

спроектовано з урахуванням можливого використання гарнітур віртуальної реальності. У такому варіанті взаємодія відбувається за допомогою контролерів Oculus Quest 2 (рис.2.31), що дозволяє користувачу маніпулювати компонентами руками, змінювати налаштування жестами та переміщатися в просторі лабораторії, спостерігаючи за процесом друку з будь-якого ракурсу (рис.2.32).

Таким чином, UI-інтерфейс у симуляторі 3D-принтера JGMaker Magic на базі Unity виступає не лише як засіб виведення параметрів, а як повноцінна навчальна система. Він забезпечує точне налаштування, інтуїтивну взаємодію з віртуальними об'єктами, гнучкість у способах управління та глибоке занурення у процес 3D-друку. Усе це дозволяє користувачам не просто спостерігати, а й активно навчатися, набуваючи практичних навичок у безпечному симульованому середовищі.



Рис.2.31. Контролери Oculus Quest 2

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

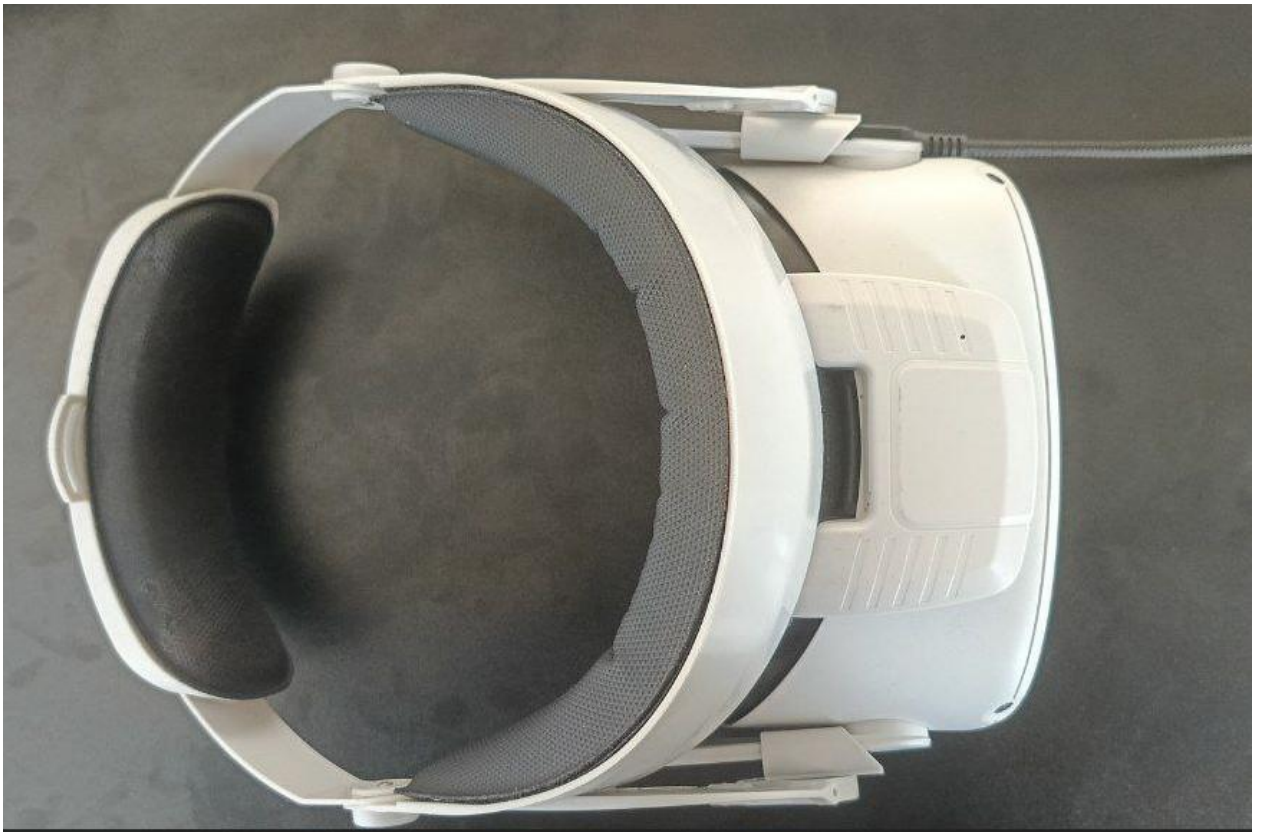


Рис.2.32. Шолом Oculus Quest 2

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

### РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ

У сучасному аграрному виробництві 3D-принтери відіграють дедалі важливішу роль, дозволяючи оперативно виготовляти запасні частини для техніки, елементи поливних систем, корпуси для датчиків моніторингу й інші компоненти, необхідні для адаптації до умов сільського господарства. Проте їх експлуатація пов'язана з низкою потенційних небезпек: перегрів екструдера, неправильне налаштування параметрів друку, механічні помилки під час складання, а також порушення техніки безпеки можуть призводити до пошкодження обладнання або травмування персоналу, особливо в умовах обмеженого доступу до технічного сервісу.

У зв'язку з цим створення віртуального симулятора роботи 3D-принтера в середовищі Unity, з підтримкою гарнітури Oculus Quest 2, стало ефективним рішенням для безпечного навчання персоналу. Такий симулятор дозволяє відтворити весь процес взаємодії з принтером — від складання і налаштування до запуску друку — у віртуальному середовищі, де кожна дія супроводжується візуальними та звуковими підказками, а потенційні помилки моделюються без ризику для здоров'я чи обладнання.

#### *Ключові загрози та їх моделювання в Unity*

У аграрному виробництві 3D-принтери застосовують для виготовлення деталей обладнання й датчиків, але робота з ними пов'язана з технічними, електричними та організаційними ризиками. Симулятор у Unity дозволяє заздалегідь виявити такі загрози:

- Перегрів екструдера чи платформи: при досягненні критичної температури віртуальна система блокує подальший друк та виводить попередження.
- Механічні пошкодження через неправильне складання: помилки

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Яковлева А.			РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Несвідомін А.					44	
Н. Контр.					НУБіП України			
Затверд.								

при монтажі відображаються у вигляді візуалізації несправності та підказок із виправлення.

- Збої в подачі філаменту: симуляція блокування екструдера та індикація проблем з матеріалом.

- Короткі замикання й перебої електропостачання: сценарії, які відтворюють наслідки неправильного підключення або стрибків напруги, ініціюють аварійний стоп друку.

- Людський фактор: неправильно введені параметри друку або недотримання техніки безпеки при обслуговуванні простежуються через інтерактивні підказки та VR-інструктажі з демонстрацією наслідків контакту з гарячими чи рухомими деталями.

#### *Комплекс заходів безпеки та підготовка персоналу*

Для мінімізації ризиків у симуляторі реалізовані:

- Інтерактивні інструктажі з покроковим підключенням, калібруванням та запуском принтера.

- Віртуальна демонстрація ЗІЗ з належним спорядженням — рукавичками, окулярами й спецодягом.

- Моделювання типових помилок з роз'ясненням правильних дій.

- Snap Zone для точного з'єднання елементів і зниження монтажних помилок.

- VR-тестування кваліфікації: іспити в Oculus Quest 2 перевіряють вміння працювати з інтерфейсом і діяти в аварійних ситуаціях.

#### *Аудит, стандарти та законодавча відповідність*

Unity-симулятор дозволяє інтегрувати перевірки відповідності міжнародним і національним нормам:

- ISO 12100 (оцінка ризиків) — проходження сценаріїв безпечності робочої зони.

- ISO 13849 (функціональна безпека) — тестування аварійних зупинок і реакції на збої.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

- RCA (Root Cause Analysis) — аналіз інцидентів із поясненням кореневих причин.

- Інтерактивні чеклісти для переддрукарського огляду, очищення екструдера та технічного обслуговування.

*Психологічна адаптація та зниження стресу*

VR-середовище допомагає зменшити тривожність та підготувати користувача психологічно:

- “Спокійні” лабораторії з нейтральним освітленням і фонова музика для релаксації.

- Навчання без страху помилки: складні операції можна відпрацювати без ризику пошкодити обладнання.

- Режим Safe Start поступово вводить нові функції, дозволяючи адаптуватися до інтерфейсу та послідовності дій.

Таким чином, поєднання гнучкого середовища Unity, візуального й тактильного занурення через Oculus Quest 2 та ретельно продуманих модулів безпеки створює сучасний віртуальний симулятор 3D-принтера, що забезпечує ефективну підготовку фахівців та сприяє інноваційному розвитку українського агросектору.

						Арк.
					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

Вихідні дані:

### 1. Реальне навчання на 3D-принтері

Вартість промислового 3D-принтера: 200 000 грн.

Амортизація за одне навчання (1 особа): 10 % від вартості → 20 000 грн.

Витрати на пластикові філаменти (PLA/ABS) для практики: ≈ 3 000 грн (до 5 моделей).

Ремонтні витрати (пошкодження екструдера, столу тощо): ≈ 4 000 грн.

Інструктор (500 грн/год × 8 год): 4 000 грн.

Електроенергія та експлуатаційні витрати (8 год): 500 грн.

Оренда навчального приміщення та допоміжні витрати: 1 500 грн.

Загальні витрати на 1 слухача:

$$20\,000 + 3\,000 + 4\,000 + 4\,000 + 500 + 1\,500 = 33\,000 \text{ грн}$$

### 2. Віртуальне навчання (VR-симулятор 3D-принтера)

Вартість розробки ПЗ та моделювання: 180 000 грн (разова інвестиція).

VR-обладнання + потужний ПК: 120 000 грн (комплект).

Амортизація всього комплекту за 5 років при 10 операторах:

$$(180\,000 + 120\,000) / (5 \text{ років} \times 10 \text{ осіб}) = 6\,000 \text{ грн/особа за навчання.}$$

Інструктор (початковий курс адаптації, 2 год × 500 грн): 1 000 грн.

Електроенергія та обслуговування обладнання: 200 грн.

Додаткові витрати (ліцензії, оновлення ПЗ): 800 грн.

Загальні витрати на 1 слухача:

$$6\,000 + 1\,000 + 200 + 800 = 8\,000 \text{ грн}$$

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Яковлева А.			РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Несвідомін А.					47	
Н. Контр.					НУБіП України			
Затверд.								

#### 4.1. Економічний ефект

Економія на одного оператора:

$$33\ 000\ \text{грн (реальне)} - 8\ 000\ \text{грн (віртуальне)} = 25\ 000\ \text{грн}$$

При підготовці 10 операторів:

$$25\ 000\ \text{грн} \times 10 = 250\ 000\ \text{грн економії загалом}$$

Інвестиції в розробку симулятора та VR-комплект:

$$180\ 000\ \text{грн} + 120\ 000\ \text{грн} = 300\ 000\ \text{грн (одноразово)}$$

Термін окупності:

$$300\ 000\ \text{грн} / 250\ 000\ \text{грн} = 1,2\ \text{цикли навчання}$$

(тобто після підготовки 12 операторів — повне повернення інвестицій)

Впровадження віртуального симулятора роботи 3D-принтера дозволяє знизити витрати на навчання одного оператора з 33 000 грн до 8 000 грн, що забезпечує економію 25 000 грн на кожному слухачеві. Інвестиція у розробку та обладнання окупається вже після навчання близько 12 операторів, а далі — суцільна економія та зниження ризиків пошкодження реального обладнання.

#### 4.2. Окупність за один рік

Припущення: підготовка 10 операторів на рік (як і в розрахунку вище).

Щорічна економія:

$$25\ 000\ \text{грн економії} \times 10\ \text{операторів} = 250\ 000\ \text{грн}$$

Одноразова інвестиція:

$$\text{Розробка ПЗ} + \text{VR-комплект} = 300\ 000\ \text{грн}$$

Коефіцієнт окупності (Payback Ratio) за 1 рік:

$$\frac{\text{Щорічна економія}}{\text{Інвестиції}} * 100\% = \frac{250000}{300000} * 100\% \approx 83,3\%$$

За перший рік інвестиція повертається на 83,3 %.

Повне повернення коштів (100 % окупності) відбудеться трохи більше ніж за рік (після підготовки близько 12 операторів).

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

**Висновок:**

Таким чином, навіть за умови підготовки лише 10 операторів на рік майже вся сума інвестицій покривається економією, а повний break-even настане вже на наступному етапі проведення тренінгів.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

## ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи «Створення віртуального симулятора роботи 3D-принтера» обґрунтовано актуальність теми, проведено аналіз наявних рішень і виявлено їхні обмеження з точки зору безпеки та доступності навчання операторів. Розроблено архітектуру симулятора на базі Unity з використанням PhysX для фізичних розрахунків та UI Toolkit для інтерфейсу, адаптовано 3D-модель принтера JGMaker Magic і реалізовано керування рухом екструдера, платформи та ключовими параметрами друку. Створений інтуїтивний інтерфейс із слайдерами, цифровими індикаторами та Snap Zone для точного позиціонування деталей забезпечує зручність і мінімізує помилки. Симулятор протестовано в різних сценаріях—від базового друку до моделювання типових технічних збоїв і VR-режимів, що підтвердило коректність відтворення технологічного процесу. Окремо розглянуто заходи з охорони праці, які виключають ризики травматизму та пошкодження обладнання, притаманні реальній практиці. Економічні розрахунки показали, що віртуальне навчання обходиться в середньому в 8 000 грн на слухача замість 33 000 грн традиційного курсу, що забезпечує економію 25 000 грн на людину та загальну річну економію близько 250 000 грн при підготовці 10 операторів; інвестиції в розробку та обладнання (300 000 грн) окупаються вже після 1,2 циклу навчання (або на 83 % за перший рік). Отже, поставлену мету й завдання виконано повністю, а отримані результати доводять практичну значимість і ефективність розробленого рішення для навчання та досліджень у сфері адитивного виробництва.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		Яковлева А.			<b>ВИСНОВКИ</b>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевір.</i>		Несвідомін А.					50	
<i>Н. Контр.</i>					НУБіП України			
<i>Затверд.</i>								

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 070 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Розроб.</i>		Яковлева А.					51	
<i>Перевір.</i>		Несвідомін А.						
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Затверд.</i>								
						НУБіП України		



