

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерних наук
Кафедра Медіасистем та технологій
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 186 Видавництво та поліграфія
Тип програми Освітньо-професійна
Освітня програма Видавничо-поліграфічна справа
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри МСТ _____
(підпис)
«19» травня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

здобувачеві Севгіко Катерині Ігорівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Колекція кінестетичних моделей з інженерної графіки

Затверджена наказом по університету від 19 травня 2025 р. № 385 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 9 червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи

Національні та міжнародні стандарти для електронних друкованих видань; Методи та принципи побудови інтерфейсу користувача; Вимоги та міжнародні стандарти до освітніх ресурсів; Вимоги та міжнародні стандарти до тривимірного друк.


4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

1. Аналіз технічного завдання; 1.1 Вихідні обмеження; 1.2 Очікуваний результат; 2 Аналітичний огляд; 3. Інструментальна частина; 3.1 Вибір та обґрантування програмного забезпечення; 3.2 Вибір слайсера та підготовка діяльність до друку; 3.3 Сумісність обладнання; 4. Проектування 3-D моделей макету; 4.1 Структура; 4.2 Створення модулів та функціональних елементів; 4.3 Підготовка моделей до друку; 6.Текстування; Економічна частина; Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п. 5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)

Титульний слайд; Аналіз технічного завдання; Аналітичний огляд літератури; Вибір та обґрунтування програмного забезпечення; Вибір та обґрунтування друкарського обладнання; Опис практичної частини створення комплекту моделей; Економічна частина; Висновки.

6. Консультанти розділів роботи (п. 6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п. 1)


Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
Основна частина	доц. Козуб П.А.		08.06.25
Економічна частина	ас. Легеза О.М.		06.06.25

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Визначення мети, завдань і структури роботи	19.05	
2	Збір і аналіз літературних джерел та стандартів	20.05	
3	Постановка технічного завдання	22.05	
4	Розробка 3D-моделей та підготовка до друку	25.05	
5	Тестування моделей і друк макетів	27.05	
6	Розробка демонстраційної сцени (макет житлового середовища)	30.05	
7	Економічна частина	31.05	
8	Оформлення пояснювальної записки	01.04	
9	Оформлення графічної частини	02.04	

Дата видачі завдання 19 травня 2025 р.

Здобувач


(підпис)

Керівник роботи


(підпис)

доц. Павло КОЗУБ
(посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи містить: 56 с., 2 табл., 40 рис., 1 дод., 12 джерел.

КІНЕСТЕТИКА, 3D-МОДЕЛЮВАННЯ, BLENDER, 3D-ДРУК,
ІНЖЕНЕРНА ГРАФІКА, ОСВІТА, ЗАСОБИ НАВЧАННЯ.

Метою кваліфікаційної роботи є створення кінестетичних 3D моделей на основі аксонометричних проєкцій для застосування в сфері навчання викладачами інженерної графіки та суміжних напрямів.

Проаналізовано вплив кінестетичних засобів навчання на залученість до навчання та концентрацію уваги учнів під час освітнього процесу. Проведено аналіз 3D-друку в контексті реалізації кінестетичних моделей. Проаналізовано та обрано програмне забезпечення для реалізації проєкту, яким стали програми Blender та Ultimaker Cura.

Оброблено аксонометричні проєкції, за якими розроблено, створено моделі та підготовано їх до друку, проведено багатоетапну перевірку елементів на відповідність технічним вимогам. Файли створених моделей переведено в формат .STL.

ABSTRACT

Explanatory note of qualification work: 56 p., 2 tab., 40 fig., 1 app., 12 sources.

KINESTHETICS, 3D MODELLING, BLENDER, 3D PRINTING, ENGINEERING GRAPHICS, EDUCATION, TEACHING AIDS.

The aim of the qualification work is to create kinesthetic 3D models based on axonometric projections for use in the field of teaching by teachers of engineering graphics and related fields.

The impact of kinesthetic teaching aids on student engagement and concentration during the educational process is analysed. 3D printing in the context of implementing kinesthetic models is analysed. The software for the project was analysed and selected, which was Blender and Ultimaker Cura.

The axonometric projections were processed, according to which the models were developed, created, and prepared for printing, and the elements were tested for compliance with technical requirements in a multi-stage process. The files of the created models were converted to .STL format.

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ.....	9
2 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ	12
2.1 Кінестетичне навчання як педагогічна стратегія в сучасній освіті	12
2.2 Використання 3D-друку для створення кінестетичних моделей.....	14
3 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	17
3.1 Аналіз вимог до програмного забезпечення	17
3.2 Програмне забезпечення для 3D-моделювання.....	17
3.3 Програмне забезпечення для підготовки до 3D-друку.....	19
3.4 Системні вимоги та сумісність	20
3.5 Інтеграція програмного забезпечення в робочий процес.....	20
4 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ДРУКАРСЬКОГО ОБЛАДНАННЯ	22
4.1 Вимоги до друку кінестетичних моделей для освітньої діяльності	22
4.2 Аналіз типів принтерів для 3D-друку	23
4.2.1 Технологія FDM (Fused Deposition Modeling).....	23
4.2.2 Технологія SLA (Stereolithography)	23
4.2.3 Технологія SLS (Selective Laser Sintering).....	24
4.3 Вимоги до матеріалів для кінестетичних моделей	24
5 ОПИС ПРАКТИЧНОЇ ЧАСТИНИ	25
5.1 Аналіз та формування завдання.....	25
5.2 Інструментарій програми Blender.....	25
5.3 Створення моделей.....	27
5.4 Підготовка моделей до експорту	32
5.5 Підготовка моделей до друку	44
6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	49
ВИСНОВКИ	54
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	56
ДОДАТОК А Приклади моделей	57

ВСТУП

Інженерна графіка є однією з ключових дисциплін у підготовці фахівців технічного профілю, адже охоплює комплекс знань та навичок, необхідних для просторового мислення, створення, інтерпретації й аналізу технічних креслень. Її вивчають студенти найрізноманітніших спеціальностей – від конструкторів у проєктних бюро до інженерів з мехатроніки, архітекторів і технологів. Володіння інженерною графікою передбачає розуміння фігур у просторі, уявлення про базові фізичні взаємодії форм, досконале оперування проєкціями, розгортками, перерізами та вміння аналізувати й створювати складні креслення.

Разом з тим, сучасна освітня парадигма потребує перегляду підходів до викладання навіть традиційних технічних дисциплін. Упродовж останніх десятиліть відбувається стрімкий розвиток цифрових технологій, що впливає не лише на саму інженерію, але й на засоби її викладання. Зокрема, впровадження інновацій у сферу навчання змінює підходи до візуалізації, моделювання й фізичного представлення об'єктів, які вивчаються. Саме тому актуальним є вивчення можливостей кінестетичного навчання, яке базується на фізичній взаємодії з навчальним матеріалом.

Одним із найперспективніших напрямів у цьому контексті є 3D-друк це технологія, що вже сьогодні активно використовується у медицині, промисловості, архітектурі, дизайні та освіті. Завдяки доступності 3D-принтерів, програмного забезпечення для моделювання та цифрових платформ для обміну файлами, створення навчальних матеріалів власними силами стало набагато простішим та дешевшим. Школи, технікуми та університети дедалі частіше використовують надруковані моделі для демонстрації біологічних структур, хімічних сполук, фізичних явищ або геометричних тіл.

Кінестетичні інструменти навчання, тобто такі, що передбачають активне тактильне сприйняття об'єктів демонструють високу ефективність серед учнів і студентів. Фізична взаємодія з навчальними моделями сприяє формуванню глибшого розуміння складних понять. Особливо це стосується геометричних і просторових дисциплін, зокрема інженерної графіки..

Метою кваліфікаційної роботи є розробка та створення колекції 3D-моделей елементів інженерної графіки, які будуть використовуватися як навчальні кінестетичні засоби у технічній освіті.

Об'єктом дослідження є процес засвоєння елементів інженерної графіки у студентів технічних спеціальностей.

Предметом дослідження виступають тривимірні фізичні моделі елементів креслення, виготовлені на основі ізометричних проєкцій за допомогою засобів 3D-друку.

Завдання дослідження полягає у створенні моделей за ізометричними кресленнями, що будуть відповідати конкретним деталям або елементам у фіксованому масштабі; підготовці цих моделей до друку; багатоетапній перевірці їх функціональності та друкоспроможності; а також експорт у формати .STL або .OBJ, що підтримуються більшістю програм для 3D-друку.

Інформаційною базою дослідження слугували методичні матеріали з інженерної графіки, навчальні креслення, технічна документація з 3D-моделювання, інструкції до програмного забезпечення, а також результати тестових друків моделей.

Результатом роботи стане функціональний набір моделей, які можуть бути використані у закладах освіти як дидактичний матеріал для викладачів і як практичний інструмент для студентів. Вони дадуть змогу підвищити якість викладання інженерної графіки, поліпшити візуалізацію складних просторових форм і сприятимуть формуванню сталих інженерних компетентностей.

1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

Інженерна графіка є однією з базових дисциплін у системі підготовки фахівців технічних спеціальностей. Вона формує у здобувачів освіти критично важливі компетентності: просторове мислення, логіку побудови креслень, навички роботи з технічною документацією, здатність оперувати графічними зображеннями, відповідно до стандартів. Ці навички є фундаментальними для інженерів, архітекторів, технологів та інших спеціалістів, діяльність яких пов'язана зі створенням і читанням креслень.

Однак на практиці значна частина студентів стикається з труднощами у процесі переходу від двовимірних зображень до уявлення тривимірної форми об'єкта, особливо в темах, що стосуються аксонометричних та ізометричних проєкцій. Ускладнення виникає як на рівні сприйняття, так і на рівні застосування знань, що істотно впливає на успішність засвоєння матеріалу. Особливо це помітно при вивченні складних просторових форм, де без достатнього практичного досвіду студентам складно уявити конструкцію об'єкта в об'ємі лише за плоским кресленням.

Однією з причин таких труднощів є відсутність можливості фізичної взаємодії з об'єктом. Традиційні методи навчання передбачають роботу з площинними зображеннями, що не завжди дозволяє студентам повноцінно засвоїти принципи побудови форм у просторі. Відсутність об'ємної репрезентації перешкоджає формуванню навичок інтуїтивного розуміння логіки проєкцій та просторового розташування елементів.

З метою усунення зазначених проблем у навчальному процесі, а також для підвищення ефективності вивчення розділів інженерної графіки, що стосуються ізометричних проєкцій, пропонується створення колекції навчальних кінестетичних моделей. Такі моделі, виготовлені за допомогою технології 3D-друку, дадуть можливість забезпечити студентам практичну взаємодію з об'єктами, які відповідають навчальному матеріалу.

У процесі створення моделей як основне програмне середовище обрано Blender 3D, універсальний інструмент для побудови тривимірних об'єктів, що містить розвинуті засоби моделювання, текстурування, перевірки топології, а також підтримує експорт у популярні формати для 3D-друку. Blender дозволяє реалізувати повний цикл розробки моделей (від побудови геометрії до перевірки сумісності з параметрами друку та експорту у відповідний формат).

Застосування технології 3D-друку відкриває широкі можливості для матеріалізації навчальних об'єктів, що дозволяє студентам тримати, обертати, аналізувати моделі в реальному просторі. Водночас, підготовка моделей для друку передбачає низку технічних вимог, які необхідно врахувати на етапі моделювання.

Коректність геометрії (топології) повинна бути такою, щоб усі поверхні моделей були замкнутими та геометрично коректними. Не допускається наявність накладених полігонів, «дір», подвійних вершин або неузгоджених площин. Наявність помилок у топології може призвести до некоректного відображення чи навіть відмови у друці.

Щодо орієнтації нормалей, усі полігони повинні мати правильну орієнтацію нормалей назовні. Якщо нормалі спрямовані всередину або в різних напрямках, це може бути інтерпретовано принтером як відсутність полігонів, що спричинить втрату цілісності моделі під час друку.

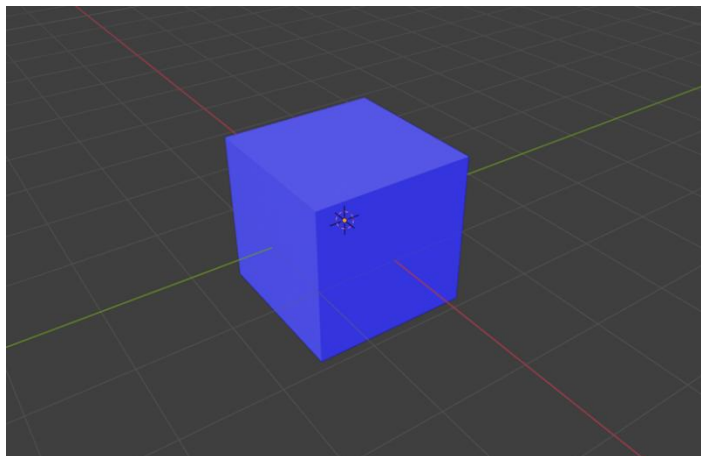


Рисунок 1.1 – Приклад правильної орієнтації нормалей у програмі Blender

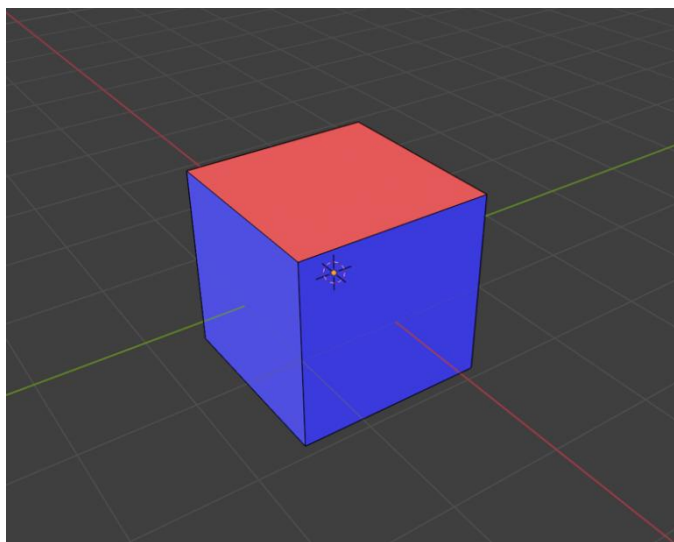


Рисунок 1.2 – Приклад неправильної орієнтації нормалей у програмі Blender

Сумісність елементів, у тих випадках, коли передбачено складання моделей з окремих частин, необхідно забезпечити точну відповідність розмірів і допусків для з'єднання. Похибки можуть призвести до неможливості поєднання частин між собою.

Також важливою вимогою є формат експорту. Кожна модель повинна бути експортована у формат .STL або .OBJ, які є найпоширенішими у програмному забезпеченні для 3D-друку. При експорті необхідно дотримуватись масштабу, орієнтації в просторі та щільності сітки, оптимальної для коректного друку.

Таким чином, технічне завдання передбачає не лише створення 3D-моделей для навчального використання, а й забезпечення їх повної функціональності та придатності до матеріалізації за допомогою 3D-друку. Дотримання вищезазначених вимог дозволить досягти як навчальної, так і технологічної ефективності результату.

2 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ

2.1 Кінестетичне навчання як педагогічна стратегія в сучасній освіті

Кінестетичне навчання являє собою один із ключових підходів у сучасній педагогічній практиці, що базується на використанні рухових та тактильних відчуттів для засвоєння навчального матеріалу. Даний підхід ґрунтується на теорії множинних інтелектів Говарда Гарднера та концепції стилів навчання, які визнають індивідуальні особливості сприйняття та обробки інформації різними учнями.

Кінестетичне навчання базується на фундаментальних принципах нейрофізіології, зокрема на взаємозв'язку між моторними та когнітивними функціями мозку. Дослідження в галузі нейронауки демонструють, що рухова активність стимулює вироблення нейротрофічного фактора мозку (BDNF), який сприяє утворенню нових нейронних зв'язків та покращує процеси запам'ятовування.

Соматосенсорна кора головного мозку, відповідальна за обробку тактильної інформації, тісно пов'язана з областями, що відповідають за мовлення, пам'ять та абстрактне мислення. Ця нейроанатомічна особливість пояснює ефективність таких методів навчання для студентів та учнів.

З психологічної точки зору, кінестетичне навчання відповідає природним потребам людини в активному дослідженні навколишнього середовища. Теорія конструктивізму Жана Піаже підкреслює важливість практичної діяльності у формуванні когнітивних структур, особливо на ранніх етапах розвитку.

Концепція втіленого пізнання свідчить про те, що когнітивні процеси нерозривно пов'язані з фізичним досвідом тіла. Це теоретичне підґрунтя надає додаткову валідність кінестетичному підходу в освіті.

Учні з переважаючим кінестетичним стилем навчання демонструють специфічні поведінкові та навчальні характеристики. До основних ознак належать:

- розвинена просторова уява;
- схильність до цілісного сприйняття явищ та процесів;
- потреба в конкретних прикладах та практичних застосуваннях теоретичних знань;
- рухова активність та потреба в частій зміні положення тіла;
- схильність до використання жестикуляції під час спілкування;
- переважання тактильного дослідження об'єктів;
- краща концентрація уваги під час виконання практичних завдань;
- методи та стратегії кінестетичного навчання.

Використання тривимірних моделей, конструкторів, макетів сприяє кращому розумінню складних теоретичних та двомірних концепцій.

Кінестетичне навчання демонструє високу ефективність у формуванні стійких навичок та глибокого розуміння навчального матеріалу. Практична діяльність сприяє розвитку критичного мислення, аналітичних здібностей та творчого підходу до розв'язання проблем.

Даний підхід особливо ефективний для засвоєння складних абстрактних концепцій, оскільки дозволяє "матеріалізувати" теоретичні знання через практичну діяльність. Багатосенсорне залучення забезпечує множинні канали кодування інформації в пам'яті, що покращує її довгострокове збереження.

Впровадження кінестетичного підходу вимагає значних ресурсів: спеціально обладнаних приміщень, навчальних матеріалів, додаткового часу на підготовку та проведення занять. Необхідність забезпечення безпеки під час практичних робіт створює додаткові вимоги до організації навчального процесу.

Найактуальнішим варіантом є диференційований підхід. Ефективне впровадження кінестетичного навчання вимагає врахування індивідуальних особливостей учнів та збалансованого поєднання різних стилів навчання.

Мультимодальний підхід, що інтегрує візуальні, аудіальні та кінестетичні елементи, забезпечує оптимальні умови для всіх категорій учнів.

Кінестетичне навчання являє собою важливу складову сучасної педагогічної практики, що базується на науково обґрунтованих принципах нейрофізіології та психології навчання. Незважаючи на організаційні та методичні виклики, даний підхід демонструє значний потенціал для підвищення ефективності освітнього процесу, особливо для учнів з переважаючим кінестетичним стилем навчання.

Подальший розвиток кінестетичного підходу має передбачати систематичні дослідження його ефективності, розробку методичного забезпечення та підготовку педагогічних кадрів. Інтеграція традиційних кінестетичних методів з сучасними технологіями відкриває нові перспективи для створення інноваційного навчального середовища, що відповідає потребам різних категорій учнів та вимогам сучасного суспільства.

2.2 Використання 3D-друку для створення кінестетичних моделей

Сучасні технології адитивного виробництва, зокрема 3D-друк, відкривають нові можливості для підвищення ефективності навчального процесу в галузі інженерної графіки. Традиційні методи викладання технічного креслення, що базуються на двовимірних зображеннях та абстрактному просторовому мисленні, можуть бути значно вдосконалені через впровадження кінестетичних навчальних моделей, створених за допомогою 3D-друку.

Кінестетичне навчання передбачає засвоєння знань через фізичну взаємодію з навчальними об'єктами. У контексті інженерної графіки цей підхід дозволяє студентам безпосередньо маніпулювати тривимірними моделями, що сприяє кращому розумінню просторових співвідношень, перерізів, проекцій та інших фундаментальних концепцій технічного креслення.

3D-друк дозволяє перетворити абстрактні геометричні побудови на фізичні об'єкти, які студенти можуть досліджувати органами чуттів. Це особливо важливо для розуміння складних просторових взаємозв'язків, таких як взаємне розташування площин, лінії перетину поверхонь, та утворення тіней у технічному кресленні.

Технологія 3D-друку дозволяє створювати моделі різного рівня складності відповідно до індивідуальних потреб студентів. Для початківців можуть бути виготовлені спрощені моделі базових геометричних тіл, тоді як для просунутих студентів – складні збірки з множинними деталями та з'єднаннями.

Порівняно з традиційними методами виготовлення навчальних моделей, 3D-друк забезпечує значну економію коштів та часу. Одну цифрову модель можна роздрукувати необмежену кількість разів, що дозволяє забезпечити всіх студентів необхідними навчальними матеріалами.

При проектуванні кінестетичних моделей для вивчення інженерної графіки необхідно враховувати педагогічні цілі та технічні обмеження 3D-друку. Моделі повинні бути достатньо великими для комфортного маніпулювання, але не настільки великими, щоб ускладнювати процес друку та збільшувати витрати матеріалів.

3D-друковані моделі дозволяють студентам фізично обертати об'єкти та спостерігати, як змінюються їх проекції на різні площини. Це значно полегшує розуміння принципів ортогонального та аксонометричного проєкціювання.

Маніпулювання фізичними моделями сприяє розвитку просторової уяви студентів, що є критично важливим для успішного оволодіння інженерною графікою. Студенти можуть розбирати складні моделі на компоненти та досліджувати їх внутрішню структуру.

Спеціально спроектовані роз'ємні моделі дозволяють студентам фізично "розрізати" об'єкти та спостерігати утворені перерізи, що значно полегшує розуміння правил побудови розрізів у технічному кресленні.

Емпіричні дослідження показують, що використання кінестетичних моделей у навчанні інженерної графіки призводить до статистично значущого покращення академічних результатів студентів. Зокрема, спостерігається підвищення рівня просторового мислення на 15-25% та покращення розуміння складних геометричних концепцій на 20-30%.

Роздільна здатність 3D-принтерів може обмежувати деталізацію моделей, особливо для дрібних елементів. Також існують обмеження щодо кольорового друку, що може ускладнювати візуалізацію різних частин складних моделей.

Майбутні дослідження в цій галузі можуть бути спрямовані на розробку інтерактивних моделей з вбудованими датчиками, створення доповненої реальності для кінестетичних моделей, та розробку адаптивних навчальних систем, що автоматично підбирають оптимальні моделі для кожного студента.

Використання 3D-друку для створення кінестетичних моделей у навчанні інженерної графіки представляє собою перспективний напрямок модернізації освітнього процесу. Цей підхід дозволяє ефективно поєднувати традиційні методики викладання з сучасними технологіями, забезпечуючи більш глибоке розуміння просторових концепцій та підвищуючи мотивацію студентів до навчання. Подальший розвиток цього напрямку може суттєво покращити якість підготовки майбутніх інженерів та дизайнерів.

3 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Для створення колекції кінстетичних моделей з інженерної графіки необхідно використання спеціалізованого програмного забезпечення, яке забезпечить повний цикл розробки – від створення 3D-моделей до підготовки їх для друку. Враховуючи специфіку завдання та необхідність створення якісних навчальних матеріалів, було обрано комплекс програмних рішень, що включає Blender для 3D-моделювання та Ultimaker Cura для підготовки моделей до друку.

3.1 Аналіз вимог до програмного забезпечення

При виборі програмного забезпечення для створення кінстетичних моделей враховувалися наступні критерії:

- можливість створення точних геометричних моделей з високою деталізацією;
- підтримка експорту у формати, придатні для 3D-друку (STL, OBJ, 3MF);
- наявність інструментів для створення параметричних об'єктів;
- функціональність для створення складних поверхонь та геометричних тіл;
- можливість точного позиціонування та масштабування об'єктів;
- стабільність роботи з великими проектами;
- доступність та економічна ефективність;
- якість технічної документації та навчальних матеріалів;
- активна спільнота користувачів та розробників.

3.2 Програмне забезпечення для 3D-моделювання

Для створення 3D-моделей інженерних об'єктів розглядалися наступні програмні продукти.

AutoCAD 3D – професійний CAD-пакет з потужними можливостями параметричного моделювання. Серед переваг високі можливості технічного моделювання, інтеграція з іншими продуктами Autodesk. Недоліками є висока вартість ліцензії, складність освоєння для створення простих навчальних моделей.

SolidWorks – спеціалізоване CAD-рішення для інженерного проектування. Перевагами є відмінні можливості параметричного моделювання, інтуїтивний інтерфейс. Натомість має такі недоліки: висока вартість, надмірна складність для навчальних завдань.

Fusion 360 – хмарне CAD/CAM рішення від Autodesk. Має в собі сучасний інтерфейс, безкоштовна версія для освітніх цілей. Однак потребує постійного підключення до інтернету, обмеження безкоштовної версії.

Blender – безкоштовний програмний пакет для 3D-моделювання з відкритим вихідним кодом. Повністю безкоштовний, потужні інструменти моделювання, велика спільнота, регулярні оновлення. Орієнтація більше на художнє моделювання, ніж на технічне.

Для реалізації проекту було обрано Blender версії 4.0. Перш за все, важливою є економічна ефективність. Blender є повністю безкоштовним програмним забезпеченням з відкритим вихідним кодом, що робить його доступним для будь-яких навчальних закладів незалежно від їх бюджету.

Незважаючи на орієнтацію на художнє моделювання, Blender має потужні інструменти для створення точних геометричних форм:

- модифікатор Array для створення регулярних структур;
- інструменти Precision Modeling для точного позиціонування;
- модифікатор Mirror для створення симетричних об'єктів;
- інструменти Snap для прив'язки до сітки та об'єктів.

Blender підтримує експорт у всі необхідні формати для 3D-друку, включаючи STL, OBJ, та інші. Величезна кількість документації, відеоуроків та навчальних матеріалів українською та англійською мовами полегшує освоєння програми. Blender ефективно працює на різних конфігураціях

обладнання, включаючи комп'ютери навчальних закладів з обмеженими ресурсами.

3.3 Програмне забезпечення для підготовки до 3D-друку

Для підготовки 3D-моделей до друку необхідне спеціалізоване програмне забезпечення, а саме слайсер, що перетворює тривимірну модель у послідовність команд для 3D-принтера.

PrusaSlicer – безкоштовний слайсер від компанії Prusa Research. Характеризується високоякісними профілями друку та активною розробкою, проте оптимізований переважно під принтери Prusa.

Cura від Ultimaker – безкоштовний слайсер з відкритим вихідним кодом. Відзначається підтримкою широкого спектру принтерів, інтуїтивним інтерфейсом та великою базою профілів матеріалів.

Simplify3D – комерційний слайсер з потужними налаштуваннями та якісною підтримкою, однак має високу вартість ліцензії.

Для підготовки моделей до друку обрано Ultimaker Cura версії 5.10 з таких міркувань:

- універсальність;
- зручність використання;
- якість слайсингу;
- профілі матеріалів;
- підтримка додаткових функцій.

Cura підтримує понад 400 моделей 3D-принтерів різних виробників, що забезпечує можливість використання моделей на різному обладнанні навчальних закладів.

Програма має інтуїтивний інтерфейс з можливістю роботи як у простому режимі для початківців, так і в експертному режимі з детальними налаштуваннями.

Cura використовує передові алгоритми для генерації траєкторій друку, що забезпечує високу якість готових виробів.

Програма містить велику базу готових профілів для різних типів філаментів (PLA, ABS, PETG, TPU тощо).

Можливість додавання підтримок, створення рафтів, налаштування заповнення та інших параметрів друку.

Cura повністю безкоштовна, що важливо для освітніх проєктів.

3.4 Системні вимоги та сумісність

Для ефективної роботи з обраним програмним забезпеченням рекомендуються наступні характеристики комп'ютера:

Для Blender:

- операційна система: Windows 10/11, macOS 10.15+, Linux;
- процесор: 64-розрядний четириядерний CPU;
- оперативна пам'ять: 8 ГБ RAM (рекомендовано 16 ГБ);
- відеокарта: OpenGL 4.3 сумісна з 2 ГБ VRAM;
- вільне місце на диску: 500 МБ.

Для Ultimaker Cura:

- операційна система: Windows 7+, macOS 10.15+, Linux;
- процесор: Intel Core 2 або AMD Athlon 64;
- оперативна пам'ять: 4 ГБ RAM;
- відеокарта: OpenGL 2.0 сумісна;
- вільне місце на диску: 200 МБ.

3.5 Інтеграція програмного забезпечення в робочий процес

Обрані програми забезпечують повний цикл створення кінестетичних моделей. Створення 3D-моделі в Blender, що включає розробку геометричної форми з урахуванням вимог інженерної графіки. Надалі експорт у формат STL

для підготовки моделі для слайсеру, після цього імпорт в Ultimaker Cura та налаштування параметрів друку. Генерація G-коду – створення інструкцій для 3D-принтера.

Така інтеграція забезпечує безперервний робочий процес від ідеї до готового виробу, мінімізуючи втрати якості на етапах передачі даних між програмами.

Обрана комбінація Blender та Ultimaker Cura оптимально відповідає потребам проекту створення колекції кінестетичних моделей з інженерної графіки. Це рішення забезпечує:

- повну безкоштовність для освітніх цілей;
- необхідну функціональність для створення якісних навчальних моделей;
- широкі можливості для майбутнього розвитку проекту;
- доступність для впровадження в навчальних закладах з різним рівнем фінансування;
- сумісність з різними типами 3D-принтерів та матеріалів.

Вибране програмне забезпечення дозволяє реалізувати всі поставлені завдання проекту та забезпечує можливість створення високоякісних кінестетичних моделей для вивчення інженерної графіки.

4 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ДРУКАРСЬКОГО ОБЛАДНАННЯ

4.1 Вимоги до друку кінестетичних моделей для освітньої діяльності

Кінестетичні (тактильні) моделі для вивчення інженерної графіки мають специфічні вимоги, які обумовлені їх освітнім призначенням і необхідністю забезпечення якісного сприйняття навчального матеріалу через дотик.

Що стосується функціональних вимог, першочергово необхідно звернути увагу на тактильну якість поверхні. Поверхня кінестетичних моделей повинна забезпечувати чітке розрізнення різних елементів конструкції через дотик. Це означає, що моделі мають мати достатню деталізацію для розпізнавання ребер, граней, з'єднань та інших геометричних елементів.

Навчальні моделі підлягають інтенсивному використанню великою кількістю студентів протягом тривалого періоду. Матеріал повинен витримувати механічні навантаження, падіння, а також зберігати форму при частому контакті з руками.

Що стосується технічних вимог до точності, існують такі вимоги: геометрична точність, роздільна здатність, висота шару.

Для освітніх цілей в інженерній графіці необхідна точність позиціонування не гірше $\pm 0,1-0,2$ мм, що дозволяє адекватно передавати пропорції та розміри реальних об'єктів.

Мінімальна деталізація повинна забезпечувати відтворення елементів розміром від 0,5 мм для чіткого тактильного розпізнавання.

Для кінестетичних моделей оптимальна висота шару складає 0,1-0,3 мм, що забезпечує достатню гладкість поверхні при збереженні швидкості друку.

4.2 Аналіз типів принтерів для 3D-друку

4.2.1 Технологія FDM (Fused Deposition Modeling)

FDM технологія базується на розплавленні пластикового філаменту та його послойному нанесенні на платформу через нагріте сопло екструдера.

Переваги для освітніх цілей:

- найдоступніша технологія з точки зору вартості обладнання та матеріалів;
- широкий вибір матеріалів (PLA, ABS, PETG, композити) різних кольорів;
- простота обслуговування та безпека використання в навчальних закладах;
- можливість друку великих моделей (до 300×300×400 мм).

Серед недоліків можна виділити:

- обмежена точність та видимі шари на поверхні моделей;
- необхідність підтримок для нависаючих елементів;
- мінімальна деталізація обмежена діаметром сопла.

Характеристики FDM принтерів для освіти: точність позиціонування в межах $\pm 0,1-0,2$ мм та мінімальна товщина шару в межах $0,1-0,4$ мм.

4.2.2 Технологія SLA (Stereolithography)

SLA використовує лазер або LED-масив для полімеризації рідкої фотополімерної смоли шар за шаром.

Перевагами виділяють такі характеристики:

- висока точність та якість поверхні з мінімальними видимими шарами;
- роздільна здатність до 25-50 мікрон;
- можливість друку дуже дрібних деталей;
- гладка поверхня, ідеальна для тактильного сприйняття.

Що стосується недоліків:

- вища вартість обладнання та матеріалів порівняно з FDM;
- необхідність постобробки (промивка в ізопропанолі, УФ-доосвічування);

- потреба в спеціальній вентиляції через запах смол;
- обмежений об'єм друку порівняно з FDM.

Характеристики SLA принтерів: точність позиціонування в межах $\pm 0,025-0,1$ мм та мінімальна товщина шару в межах $0,01-0,1$ мм.

4.2.3 Технологія SLS (Selective Laser Sintering)

SLS використовує лазер для спікання порошкових матеріалів (пластик, метал, кераміка).

Перевагами є найвища міцність готових виробів, відсутність потреби підтримок, можливість друку складних внутрішніх структур.

Серед недоліків – найвища вартість обладнання, необхідність додаткової термообробки, складність обслуговування та безпеки.

4.3 Вимоги до матеріалів для кінестетичних моделей

Важливими є вимоги до матеріалів для створення кінестетичних моделей. Матеріали повинні бути нетоксичними, не виділяти шкідливих речовин при нормальних умовах використання. Повинна бути стійкість до ударних навантажень, мінімальна усадка при охолодженні.

5 ОПИС ПРАКТИЧНОЇ ЧАСТИНИ

5.1 Аналіз та формування завдання

Перший крок створення моделей – етап аналізу та створення відповідних креслень та аксонометричних проєкцій майбутніх елементів набору. Одна з важливих задач полягає в тому, щоб елементи також взаємодіяли між собою, могли б складатись. Тому було прийнято рішення розроблювати майбутні моделі таким чином, щоб отримати три пари функціональних елементів, де в кожній парі елементи мають змогу якось складатись або взаємодіяти іншим чином. Не виключалась також можливість пошуку та опрацювання/допрацювання вже існуючих креслень знайдених в інтернеті.

Після визначення моделей, що будуть розроблені, починається етап самого моделювання. Здебільшого орієнтування на приклади моделювання твердотільних елементів з використанням методів Hard-surface моделювання, яке було описано вище. Серед наших основних задач:

- створити коректну та рівномірну сітку, що дозволить в разі чого швидко та зручно редагувати моделі;
- зберегти розміри та пропорції моделей;
- зберегти можливість їх взаємодії, це варто враховувати та брати можливу похибку на неточність друку або наявність не згладжених поверхонь після друку, що може ускладнити процес взаємодії елементів.

5.2 Інструментарій програми Blender

Основними інструментами моделювання стали класичні вбудовані інструменти програми.

Інструмент Extrude (гаряча клавіша – E) дозволяє витягувати нову геометрію з наявної. Коли обирано вершини, ребра або грані й застосовано

екструзію, програма створює додаткові поверхні, які з'єднані з вихідними елементами. Це ключовий інструмент при створенні об'єму з пласкої форми.

Команда Loop Cut (гаряча клавіша – Ctrl+R) додає нову петлю ребер (loop) навколо сітки, орієнтуючись на її топологію. Застосовується для уточнення форми об'єкта, створення нових рівнів деталізації або підготовки моделі до деформації (наприклад, у ригінгу чи скульптингу).

Інструмент Knife (гаряча клавіша – K) виконує функцію «різця» – дозволяє вручну вирізати нові ребра в межах наявної геометрії. Це є доречним для точного додавання деталей у потрібних місцях, наприклад, прорізів, тріщин або додаткових форм.

Команда Inset (гаряча клавіша – I) створює внутрішній контур усередині вибраної грані або групи граней, зберігаючи їхню форму. Це особливо корисно для моделювання панелей, кнопок, рамок або вікон на поверхні.

Інструмент Bevel (гаряча клавіша – Ctrl+B) використовується для згладжування кутів і додавання фасок на ребрах або вершинах. Це дозволяє зробити модель візуально реалістичнішою, оскільки в реальному світі ідеально гострі кути трапляються рідко.

Також варто зазначити, що окрім цих інструментів є класичні інструменти маніпуляції об'єктами (інструменти трансформації), які на відміну від вищезазначених працюють як в режимі редагування (Edit mode) так і в класичному режимі (Object mode).

Інструмент Move (гаряча клавіша – G) дозволяє переміщувати об'єкти або компоненти (вершини, ребра, грані) у просторі. Можливо зміщувати їх вільно або вздовж певної осі.

Інструмент Rotate (гаряча клавіша – R) обертає вибраний об'єкт або його частину навколо обраної осі. Це корисно як для базового позиціонування, так і для складніших трансформацій при анімації.

Інструмент Scale (гаряча клавіша – S) змінює розмір об'єкта або його частин. Можливо масштабувати симетрично або лише по окремих осях.

5.3 Створення моделей

Визначившись з інструментами розробки, сам процес моделювання вимагає точності в моделях, тому для цього застосовано інструмент референсів програми (гарячі клавіші: SHIFT+A, у випадяючому вікні – Add image, далі обираю Reference. Завантажено аксонометричні проекції, бажано використовувати по одній для кожного ракурсу).

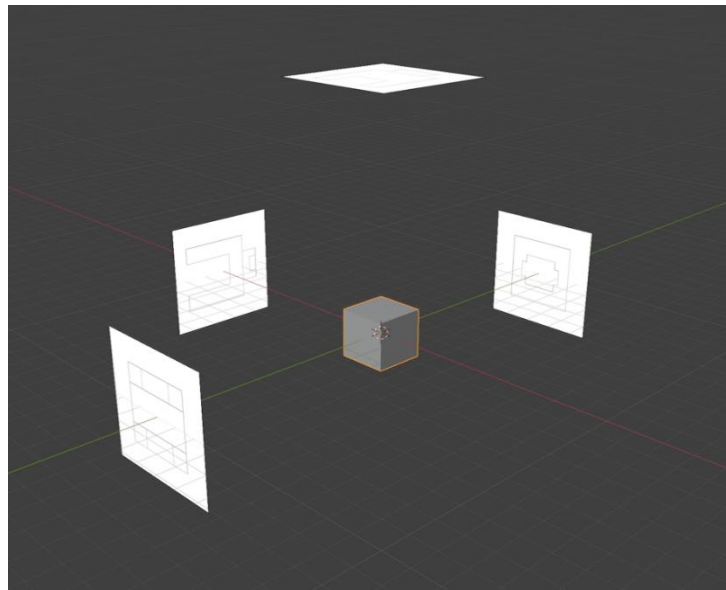


Рисунок 5.1 – Приклад референсів в просторі

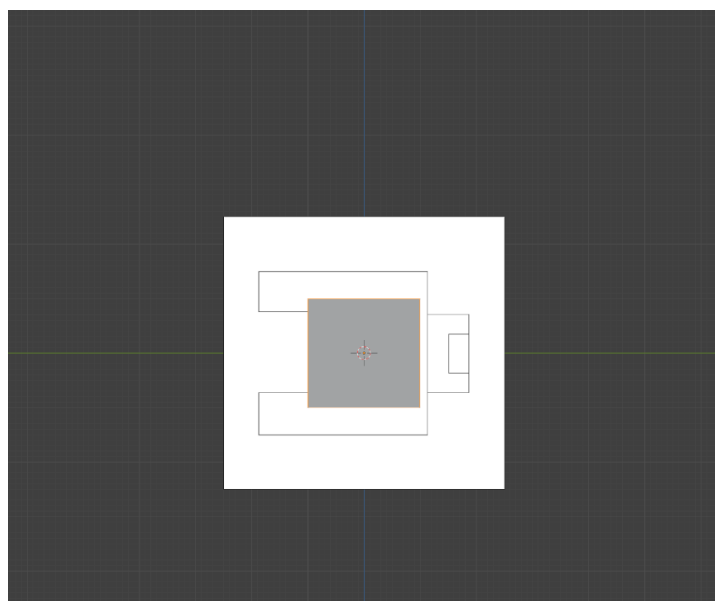


Рисунок 5.2 – Приклад референсів з ортографічної проекції (вид збоку)

Під час роботи модель регулярно піддавалась огляду з усіх сторін аби досягти максимальної точності моделювання, також варто зазначити, що програма має вбудовані функції точного моделювання, якщо наприклад визначено, що виступаючий край має бути рівно на 0.7 метрів, не потрібно підганяти його на око відносно референсу, при створенні нової геометрії для цього виступу можливо відкривати вікно детального розпису останньої функції та вписувати конкретні значення як зазначено на рис. 5.3.

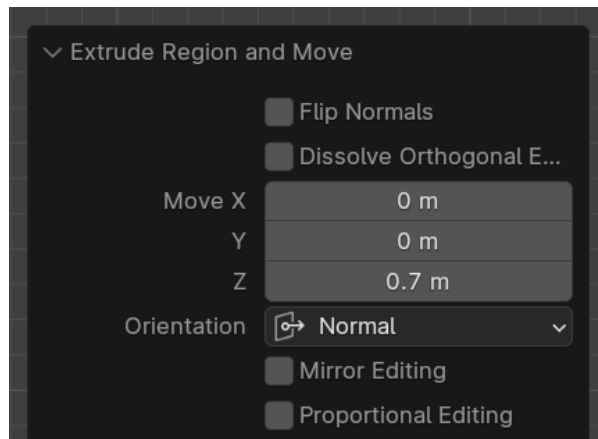


Рисунок 5.3 – Налаштування виступу при моделюванні

Також Blender заточений на використання комбінацій гарячих клавіш, що суттєво розширює можливості інструментів та їх точність, якщо наприклад потрібно підняти деякі полігони на пів метра по осі Z, можливо використати функцію детального розгляду останньої використаної функції, про яку вже зазначено, або можливо використати інструмент руху частин елементів (Move) за допомогою його комбінації клавіш , проте потім необхідно уточнювати всі його параметри. Гаряча клавіша Z звужить дію інструменту до руху за конкретною віссю, а за допомогою клавіш цифр виходить вписати точний рух, тобто в кінці введена нами комбінація буде виглядати як – G-Z-0,5-ENTER.

Після створення моделей вони можуть мати приблизно такий вигляд, так як на початку зручніше працювати з низько полігональними об'єктами, адже їх легше редагувати. Результат таких дій на рисунку 5.4.

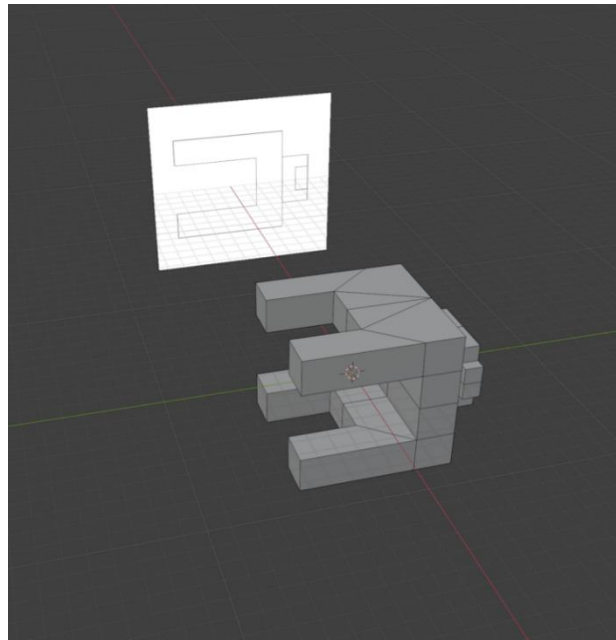


Рисунок 5.4 – Низькополігональна версія елемента

Важливим моментом є те, що більшість об'єктів в роботі симетричні відносно однієї або більше вісей, що дозволяє нам пришвидшити етап моделювання використовуючи модифікатор Mirror (рис. 5.5), який створює копію об'єкта або його частини відносно власного центра враховуючи вказані вісі.

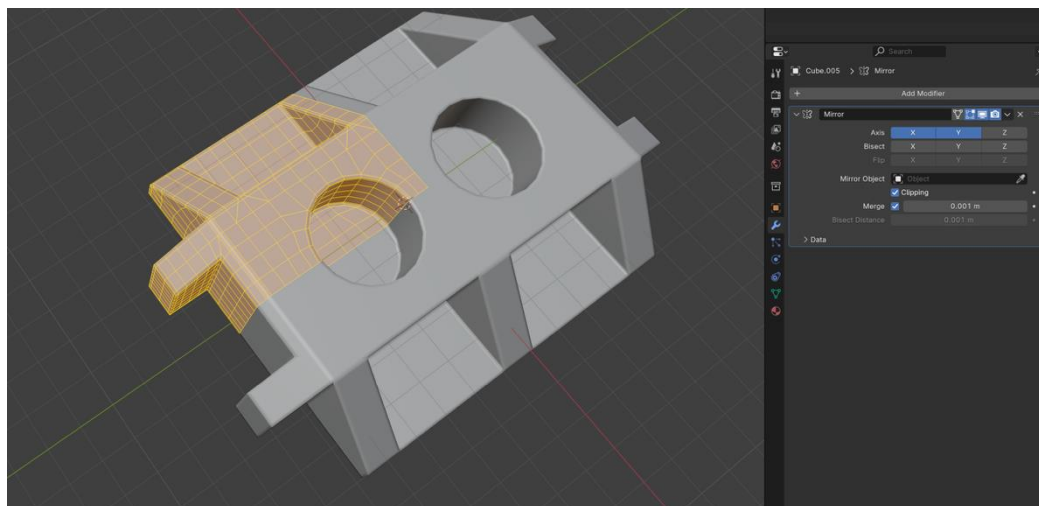


Рисунок 5.5 – Приклад застосування модифікатору Mirror

На рисунку 5.5 виділене помаранчевим кольором частини які створювались власноруч, все ж інше автоматизоване віддзеркаленням модифікатором відносно осей X та Y.

Після розробки моделей можливо більш детально працювати з сіткою, для того, щоб зробити її якомога більш рівномірною, що забезпечить коректну роботу модифікатора Subdivision surface. Цей інструмент забезпечить більш плавну геометрію та покращить вид моделі для візуалізації. Також модифікатор згладить всі грані, це особливо помітно на циліндричних формах, що за замовчуванням складаються з 32 ребер, що може викликати ефект ребристих граней.

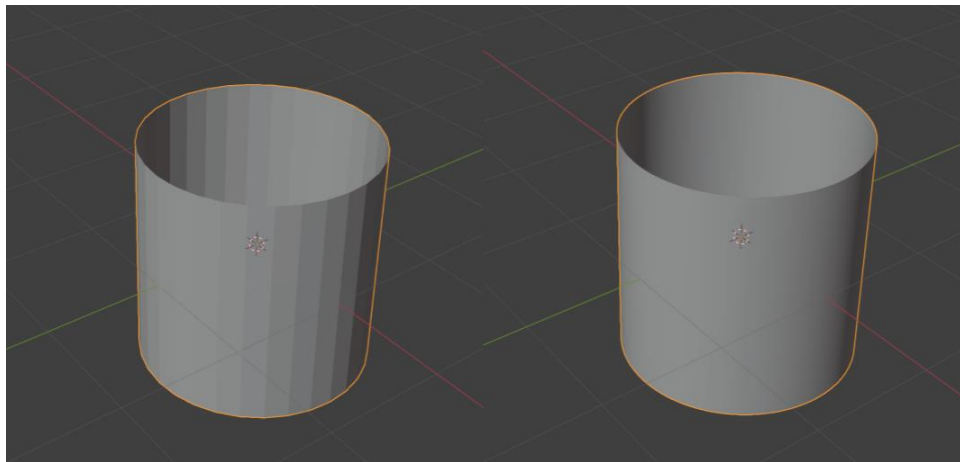


Рисунок 5.6 – Приклад використання модифікатора Subdivision surface

В роботі необхідно враховувати, що модифікатор також згладжує кутові грані, що може суттєво змінювати форму моделі.

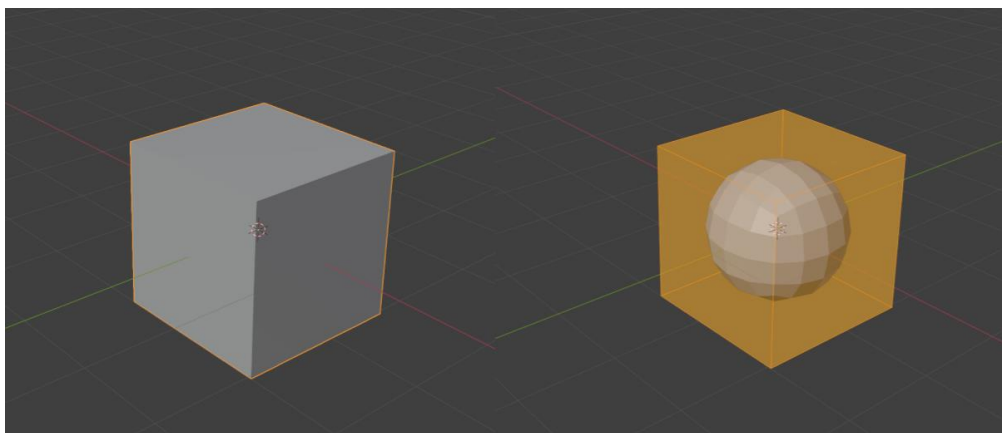


Рисунок 5.7 – Приклад роботи модифікатора Subdivision surface на низькополігональному примітиві

Для коректної роботи згадження модифікатору на рисунку 5.7 необхідно скористатись інструментом Loop Cut, ним потрібно створити спеціальні грані формування гостроти на кутах моделі, за рахунок збільшення полігональності. Такі маніпуляції забезпечують більш стабільну форму, при цьому не втрачаючи ефектів модифікаторів. Тому необхідно розставити аналогічні грані на всіх наших моделях, натомість робити це варто тільки після того, як сформована рівномірна сітка (рис. 5.8).

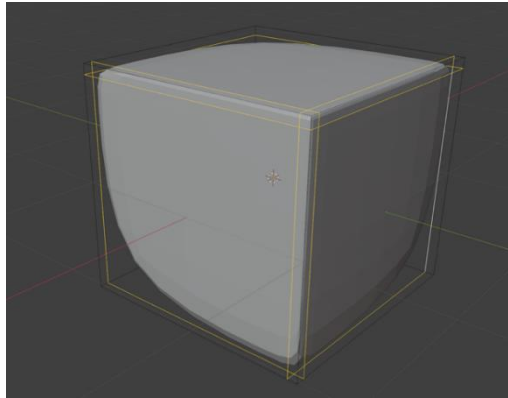


Рисунок 5.7 – Приклад граней формування гостроти

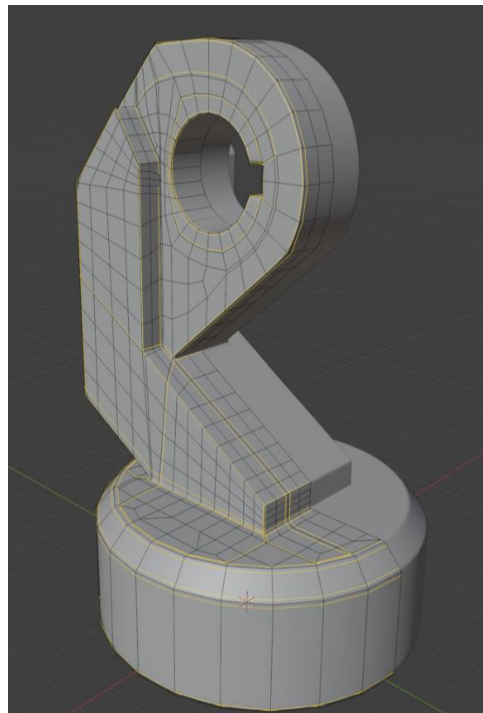


Рисунок 5.8 – Приклад зробленої моделі з рівномірною сіткою та формуючими гранями

В роботі здебільшого формуючі грані створені вручну, але також можливо їх автоматичне створення при застосуванні інструмента Bevel на гранях зі спеціальними параметрами (рисунок 5.9).

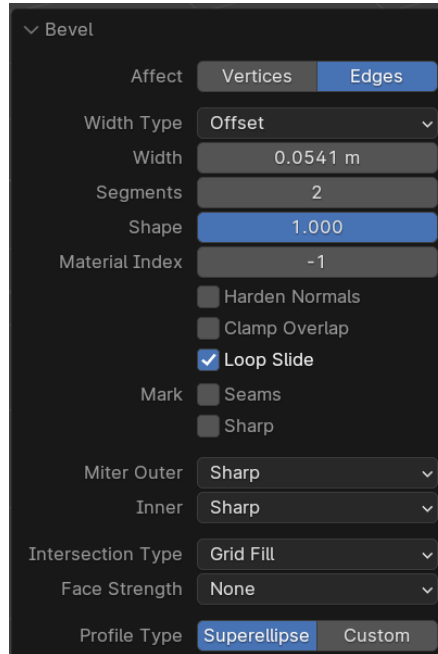


Рисунок 5.9 – Налаштування інструмента Bevel для формуючих граней

5.4 Підготовка моделей до експорту

Завершальним етапом розробки моделей є перевірка та підготовка наявних елементів до експорту для друку. Файл вважається підготовленим до друку, коли він відповідає технічним вимогам, що забезпечить його безпроблемний експорт та пряму взаємодію з принтером. Серед найважливіших вимог:

- внутрішні масштаби моделі в ПО Blender;
- орієнтація нормалей полігонів для кожного елемента;
- масштаб;
- топологія моделі;
- параметри експорту.

Саме такий порядок перевірки моделей та підготовки їх до друку забезпечить своєчасну перевірку кожного аспекту елементів конструктора, в

якій зміна чогось на певному етапі перевірки не зіпсує прогрес змін на попередньому етапі.

Правильність внутрішніх масштабів: програма Blender має параметр Scale для кожного об'єкту в робочому просторі, який описує пропорційність відносно трьох ключових координат – X, Y, Z, що на пряму впливає на сприйняття програми цієї моделі, адже цей параметр корегує роботу деяких інструментів, наприклад, на створення фасок (рисунок 5.10-рисунок 5.11).

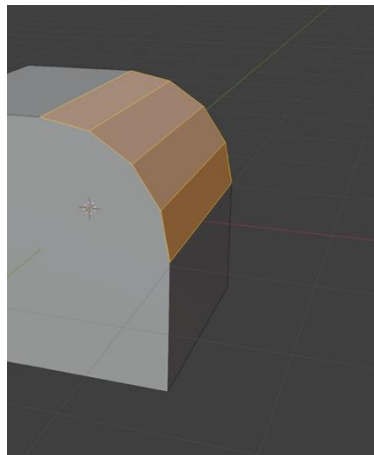


Рисунок 5.10 – Приклад коректної роботи інструмента створення фасок

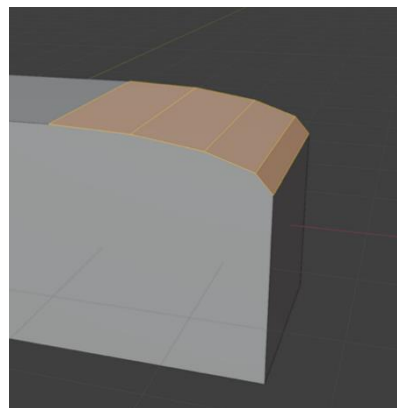


Рисунок 5.11 – Приклад некоректної роботи інструмента створення фасок

Це лише один з багатьох видів впливу спотворених пропорцій на роботу інструментів моделювання, інструментів розгортки та багатьох інших, проте можна це досить легко виправити анулювавши зміни пропорцій, за допомогою функції Apply (комбінація клавіш Control+A в режимі “Object mode”).

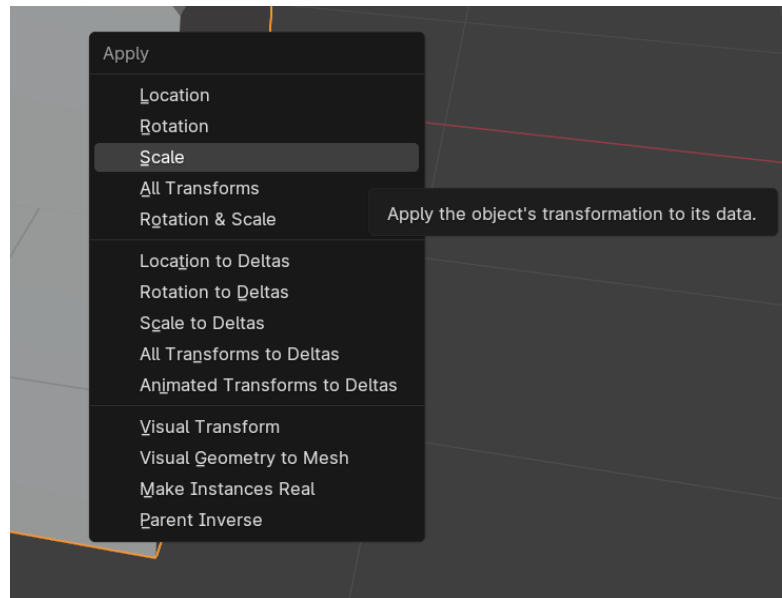


Рисунок 5.12 – Приклад застосування функції Apply

Наступним кроком є перевірка орієнтації нормалей полігонів моделі за допомогою вбудованих індикаторів програмного забезпечення Blender. Важливим для нас індикатором є функція, яка називається «Face orientation» (рис. 5.13).

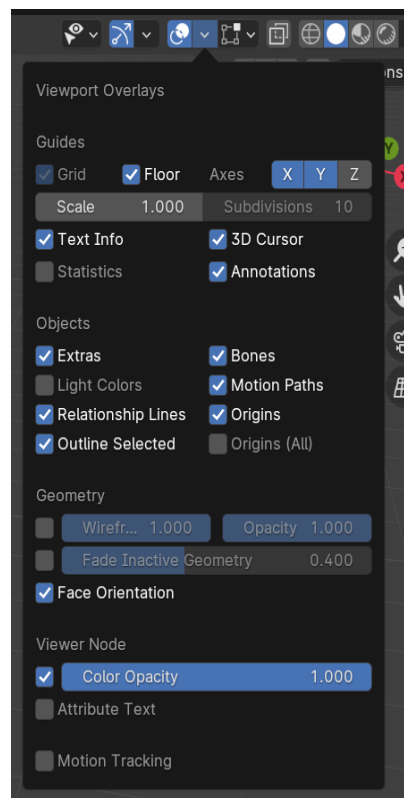


Рисунок 5.13 – Інформативне вікно з функцією Face orientation

Даний індикатор позначає всі полігони в два різних кольори: червоний та синій. Синій колір відповідає правильній зовнішній орієнтації нормалей полігонів, а червоний – внутрішній орієнтації, тому якщо на поверхні моделі є червоні полігони, це означає, що орієнтація їхніх нормалей неправильна і потребує виправлення (рисунок 5.14).

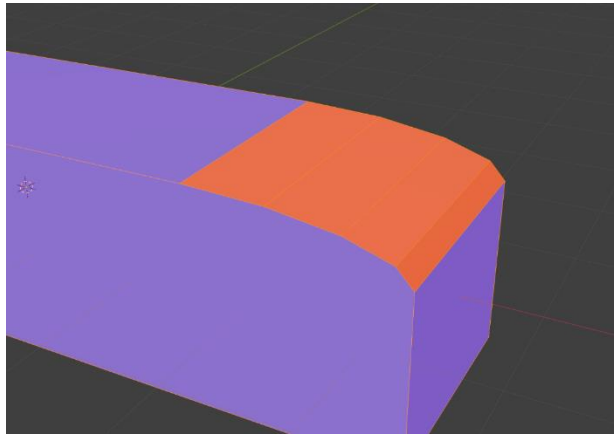


Рисунок 5.14 – Модель з функцією Face orientation

Можливо змінювати напрямлення орієнтації нормалей полігонів за допомогою функції “Normals” (комінація клавіш ALT+N). Для цього потрібно в режимі редагування топології моделі (Edit mode) увімкнути режим вибору саме полігонів, як на рисунку 5.15.

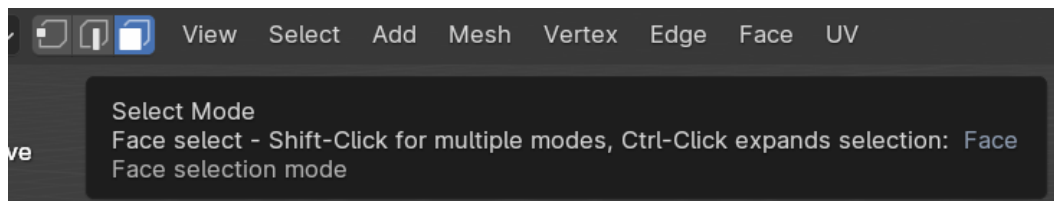


Рисунок 5.15 – Вибір редагування полігонів

Після цього обрати потрібні неправильно-орієнтовані полігони та викликати функцію “Normals” та обрати одну з двох підфункцій – «Flip», що змінить орієнтацію нормалей обраних елементів не враховуючи інших елементів моделі (краще використовувати у випалку, коли вручну обирали неправильно-орієнтовані полігони) або функцію «Recalculate outside», яка

зробить всі зовнішні полігони «правильними», більш автоматична версія попередньої функції.

Також варто зазначити, що при використанні цих функцій не на низькополігональних моделях, а на повноцінних багатополігональних моделях (наприклад, середня кількість полігонів в одному елементі нашого набору приблизно шістдесят тисяч трикутників) стає важко відслідкувати всі неправильно орієнтовані полігони, хоч вони і можуть викликати певні «артефакти» на моделях (рис. 5.16).

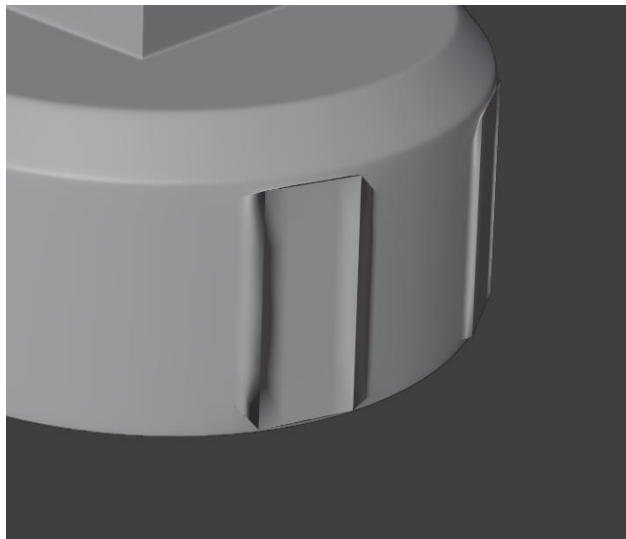


Рисунок 5.16 – Приклад артефактів

Для спрощення виділення всіх неправильно-орієнтованих полігонів можливо використати функцію «Select similar», яка дозволяє обирати схожі за певною особливістю елементи моделі, викликати цю функцію за допомогою комбінації клавіш SHIFT+G. В такому випадку побудовано логічну послідовність дій, яка виглядатиме так:

- включення індикатора орієнтації нормалей полігонів (Функція Face orientation);
- вибір одного полігону з неправильною орієнтацією;
- виклик функції «Select similar»;
- вибір підфункції «Normals»;

- виклик функції редагування орієнтації нормалей «Normals»;
- вибір підфункції «Flip».

На даному етапі з'явилась впевненість, що артефакти зникли та проблем пов'язаних з орієнтацією нормалей полігонів.

Наступним етапом є перевірка масштабу для експорту і встановлення розміру кінцевої моделі в реальному житті. Програма Blender за замовченням виставлена в метричній системі і умовні поділення сітки в робочому просторі також відповідають розміру в один метр. Проте ці параметри можуть бути змінені одразу при запуску, тому варто їх також перевірити – це потрібно зробити справа у вікні Properties у вкладці Scene (рис. 5.17).

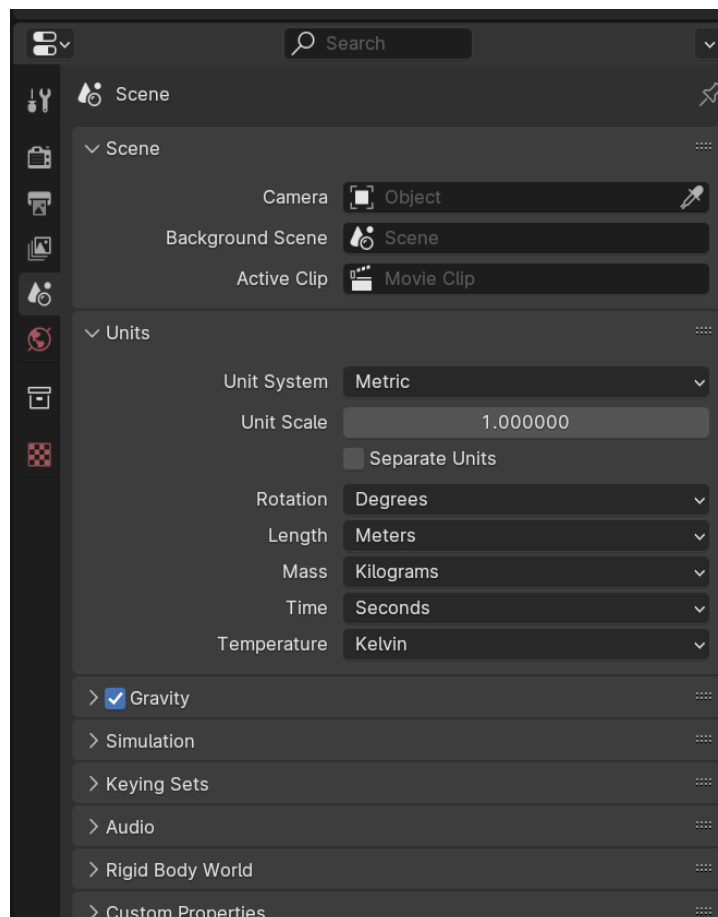


Рисунок 5.17 – Параметри для встановлення метричних налаштувань

Більш імпірична версія цього медота може виглядати таким чином:

- створення об'єкту;
- розкриття параметрів останньої дії;

– встановлення розміру створеного предмета, який буде також відповідати і сітці програми (рис. 5.18).

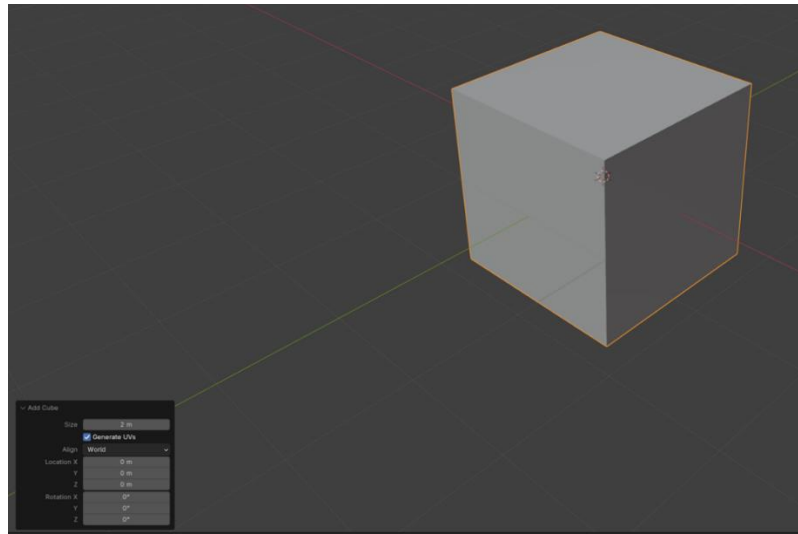


Рисунок 5.18 – Альтернативний спосіб встановлення розміру

Необхідно перетворити документ в потрібні одиниці виміру, що є сантиметрами, адже ціль роботи в тому ж числі, створити достатньо компактні моделі, аби з ними було легко та зручно працювати руками, а також задля економічності друку. Це перетворить всі наші розміри пропорційно в нові одиниці виміру (умовна висота деталі, яка складає 3.4 м стане 3.4 см).

Після роботи з масштабом потрібно впевнитись в правильності топології моделі, хоч це і бажано робити весь час впродовж моделювання, все ж варто перед друком перевірити рівність всіх поверхонь та загальну будову. Серед основних помилок, що нас цікавлять це:

– наявність неправильних полігонів (всі полігони, що налічують більше ніж чотири кути автоматично становляться n-гонами, тобто будуть важче обробляться програмами, можуть створювати артефакти на моделі та ускладнювати роботу модифікаторів);

– наявність нерівних поверхонь, які задумувались рівними і які в процесі роботи або дій модифікаторів викривились і потенційно можуть створювати нависання елементів моделі, що суттєво ускладнить друк);

- наявність елементів що не лежать на площинах моделі а існують поза нею (це могло статись в процесі видалення певних частин моделі);
- наявність незакритих елементів (це було б помітно при виправленні орієнтації нормалей полігонів, тому не потребує великої кількості уваги).

Вирішуються всі ці проблеми за допомогою вже вбудованих інструментів програми Blender. Неправильні полігони (вони ж n-гони) можна знаходити за тим же принципом який ми використовували при роботі з пошуком полігонів з неправильною орієнтацією нормалей, тобто за допомогою функції «Select similar» (Комбінація клавіш SHIFT+G, проте в цей раз за параметром «Polygon Sides»). Якщо ж не можливо знайти один такий полігон, за допомогою якого знайдемо аналогічні, ми можемо його створити і використовувати його як приклад (рис. 5.19).

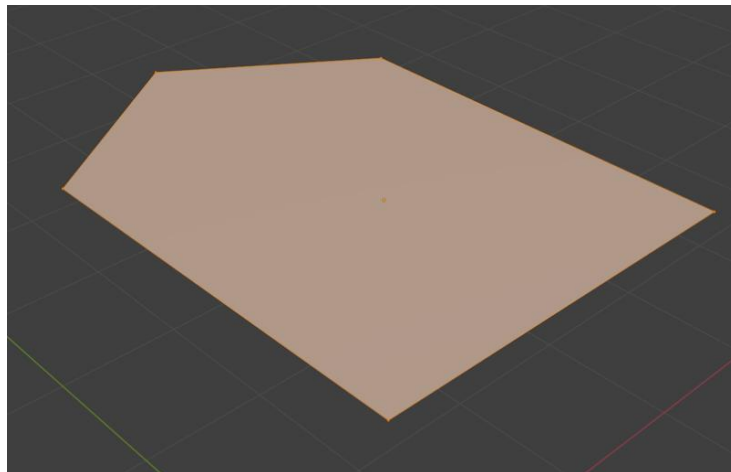


Рисунок 5.19 – Приклад n-гону

Після цього потрібно перейти в режим редагування (edit mode) одночасно для цього полігона і моделі для перевірки, щоб зробити це можливо в режимі Object mode обрати обидва наші об'єкти та натиснути кнопку TAB, що перенесе нас в режим редагування (рис. 5.20).

Після цього так само обрати n-гон та застосувати функцію «Select similar»-«Polygon sides» (рис. 5.21).

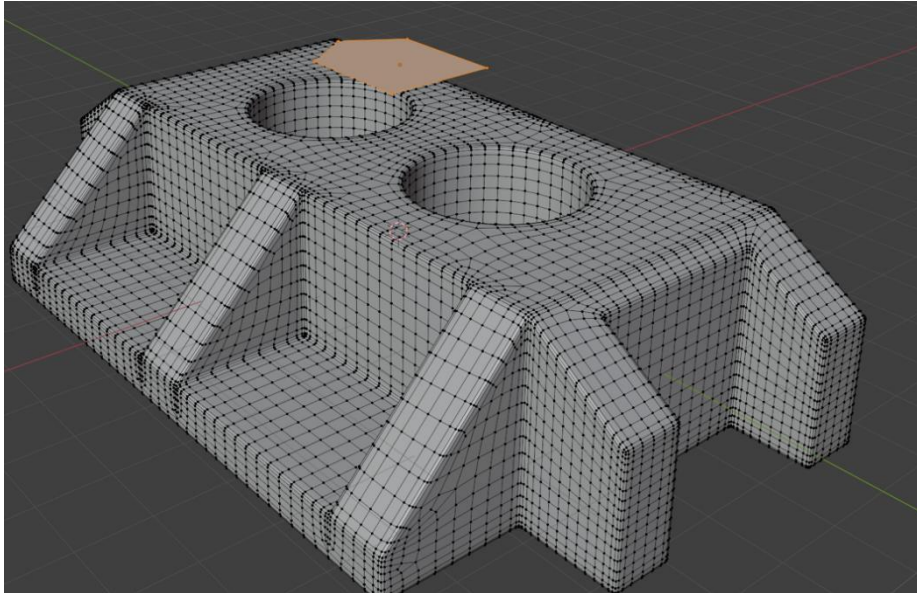


Рисунок 5.20 – Перевірка моделі з н-гоном

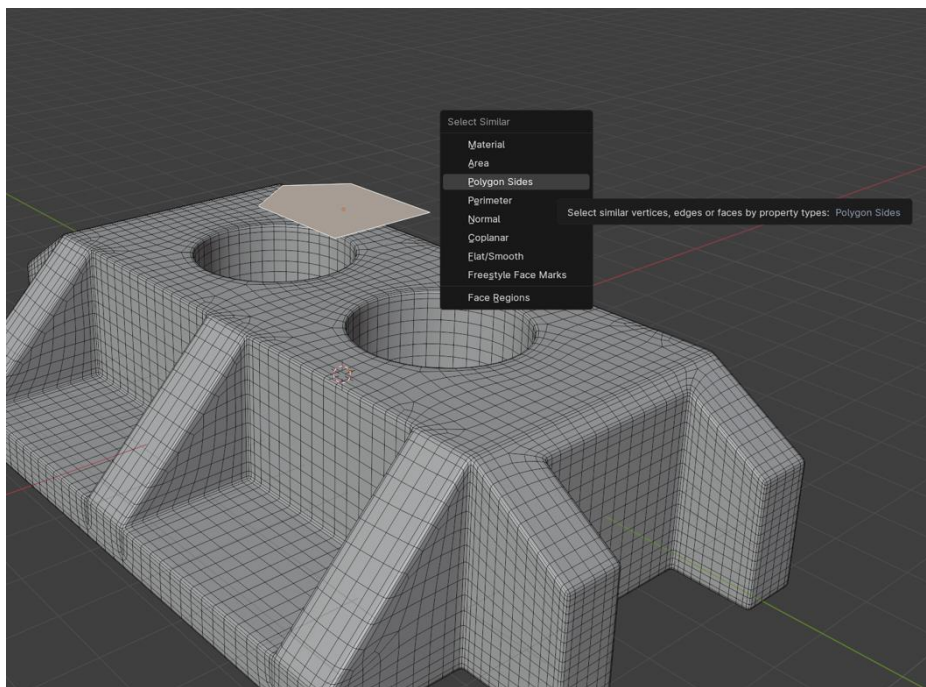
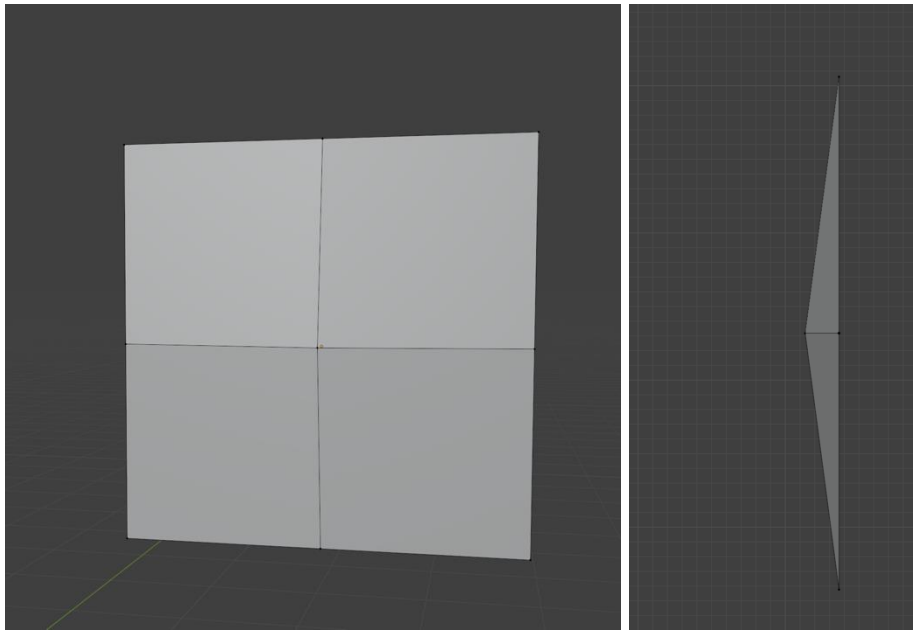


Рисунок 5.21 – Застосування функцій «Select similar»-«Polygon sides»

При знаходженні таких полігонів їх варто виправити за допомогою наявних інструментів, таких як Knife, LoopCut чи інших релевантних під ситуацію. Після виправлення всіх н-гонів, ми маємо вирішити проблеми із нависаннями частин, які не задумувались такими.

Приклад того, як виглядає нерівна геометрія з різних ракурсів і чому це може бути непомітно на рисунку 5.22.



Рисунку 5.22 – Нерівна геометрія

Це дуже легко виправити за допомогою вбудованого розширення програми під назвою LoopTools, яке вмикається за допомогою Edit-Preferences-Addons і пошуком потрібного нам розширення (рис. 5.23).

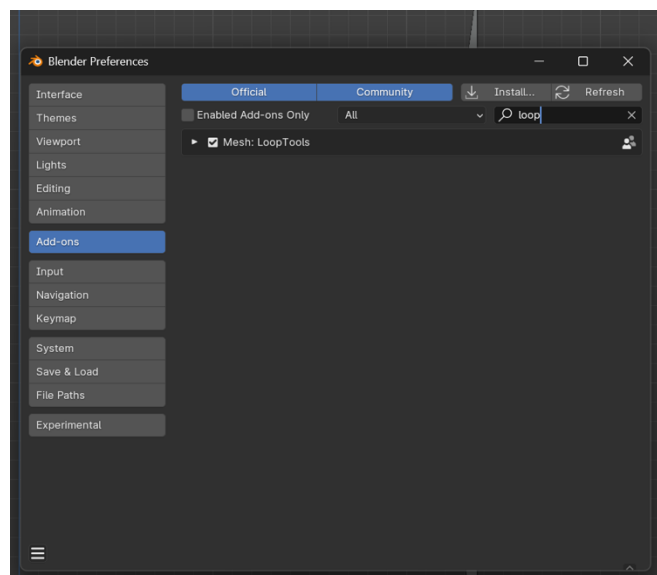


Рисунок 5.24 – Розширення LoopTools

Після активації розширення, необхідно застосовувати нові доступні функції, які викликаються за допомогою натискання правкої кнопки миші в режимі редагування (рисунок 5.24).

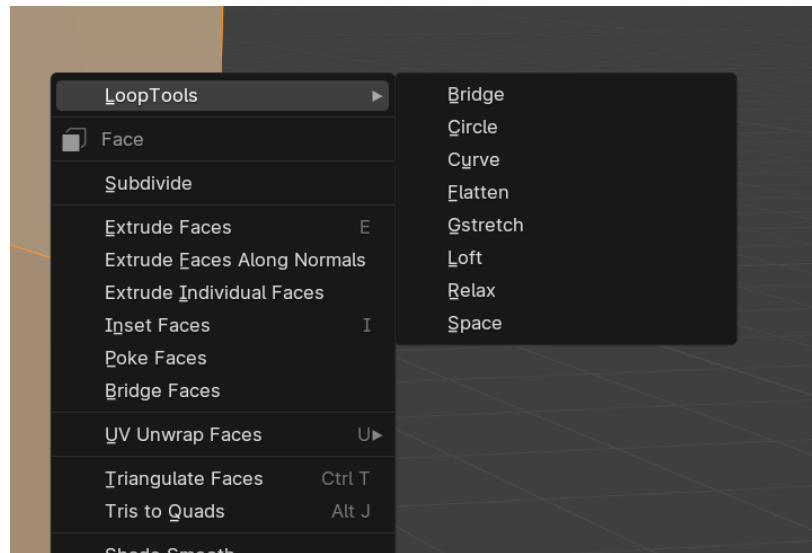


Рисунок 5.24 – Функції інструменту LoopTools

Відповідна до задачі функція називається – Flatten, і виконує задачі вирівнювання обраних елементів моделі. В наступному прикладі необхідно обрати всі полігони та застосувати функцію (рисунок 5.25).

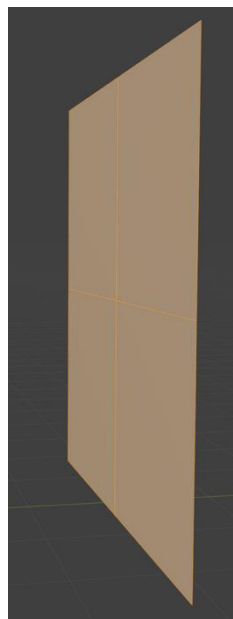


Рисунок 5.25 – Результат функції Flatten

Подібним чином потрібно проробити з усіма рівними площинами наших моделей. Варто зазначити, що це робити бажано перед застосуванням модифікатора Subdivision Surface, адже після нього кути моделі можуть

ставати більш гладкими, що ускладнює вибір полігонів в одній площині, проте це не обов'язково, адже функція працюватиме в будь-якому випадку.

Останнім кроком підготовки моделей до друку є етап експорту моделі у відповідний формат, який в даному випадку може бути .OBJ або .STL (перший зручніший у випадку передачі його третім особам для редагування, адже всі сучасні програми здатні його читати, що позбавить потреби в використанні якогось конкретного програмного забезпечення, другий більше підходить для 3D-друку, адже краще читається слайсерами та просто принтерами). Для того, щоб вивести модель в інший формат нам потрібно обрати потрібний нам елемент та зайти в меню експорту, яке надасть нам варіанти вибору файлів як на рисунку 5.26.

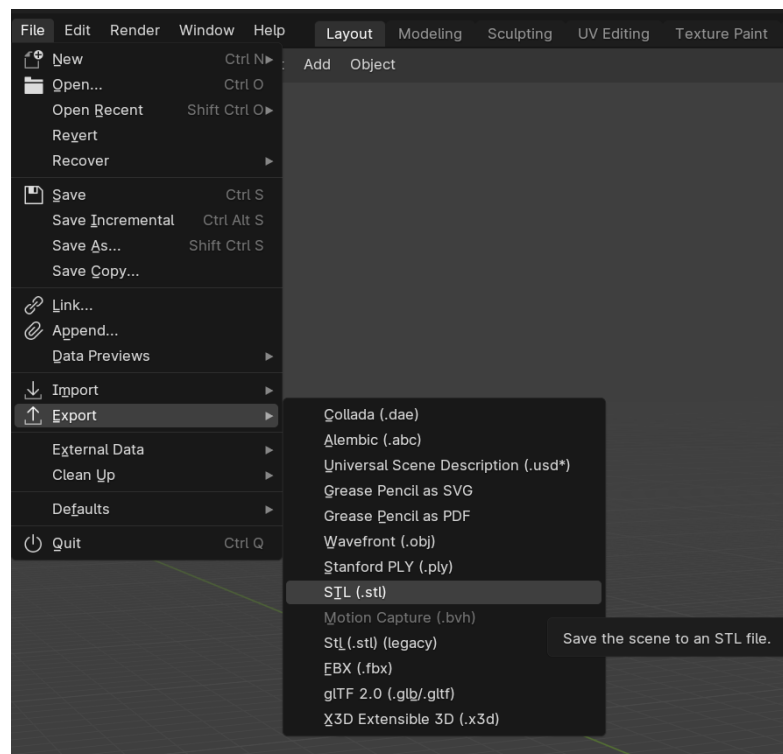


Рисунок 5.26 – Налаштування експорту моделі

В параметрах саме .STL файлів змінювати нічого не потрібно, цікавить тільки один параметр – Include, там необхідно відмітити параметр Selection only, що дозволить експортувати кожен елемент окремо в різні моделі (рис. 5.27).

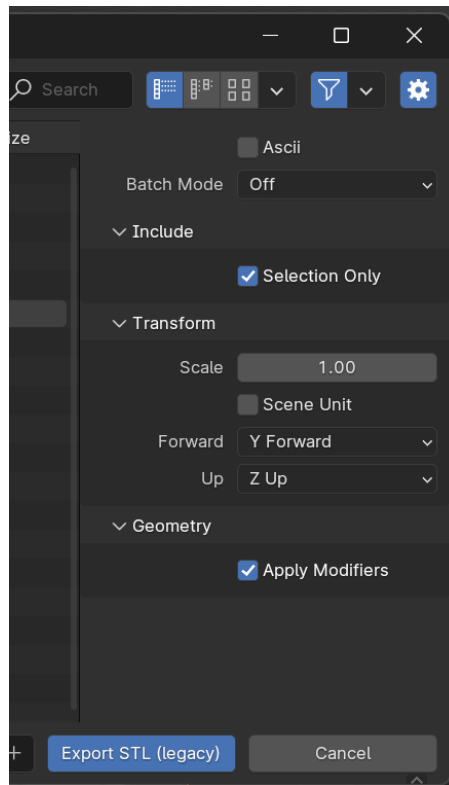


Рисунок 5.27– Параметр Selection only

Після цього отримані файли моделей можна вважати перевіреними та підготованими до друку за виключенням створення підтримок, які створюються автоматично принтером.

5.5 Підготовка моделей до друку

Завершальним етапом підготовки моделей до 3D-друку є обробка файлів у програмному забезпеченні для слайсингу, а саме в обраному раніше Ultimaker Cura. Дана програма забезпечує автоматичне генерування підтримуючих структур у критичних зонах моделей, а також оптимізацію орієнтації об'єктів у робочому просторі принтера.

Первинним кроком роботи в програмному середовищі є конфігурація параметрів 3D-принтера. При початковому запуску програми користувачеві автоматично пропонується здійснити вибір відповідної моделі принтера через спеціалізоване діалогове вікно налаштувань (рис. 5.28).

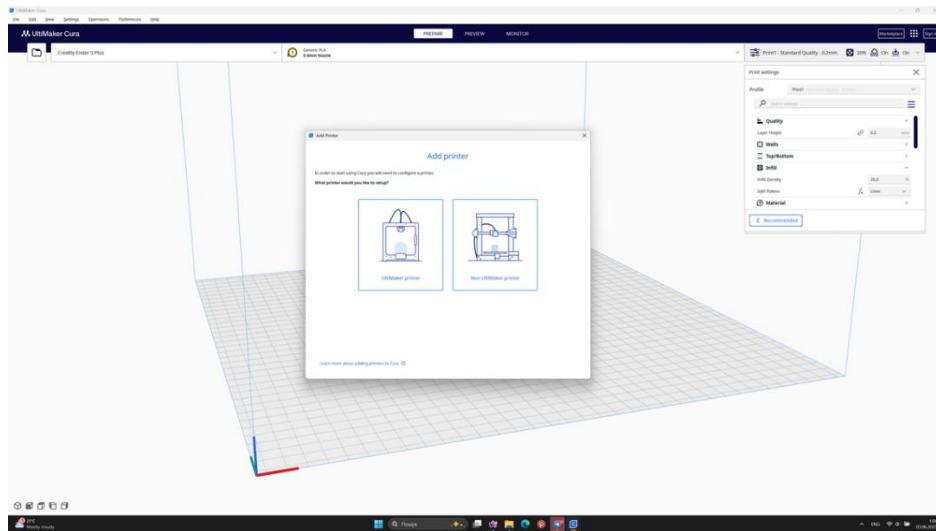


Рисунок 5.28 – Вікно вибору принтера

Необхідно обрати категорію "Non-ultimaker printer" з переліку доступних варіантів. Для демонстрації процесу налаштування буде використано один із запропонованих принтерів, а саме модель Creality Ender 5Plus.

Після завершення процедури вибору та конфігурації принтера необхідно здійснити послідовне завантаження 3D-моделей, призначених для друку. Дана операція виконується за допомогою функціональної кнопки, розташованої у верхньому лівому куті інтерфейсу програми та позначеної іконкою папки. Через відкрите діалогове вікно користувач може обрати відповідні STL-файли підготовлених моделей для подальшої обробки (рис. 5.29).

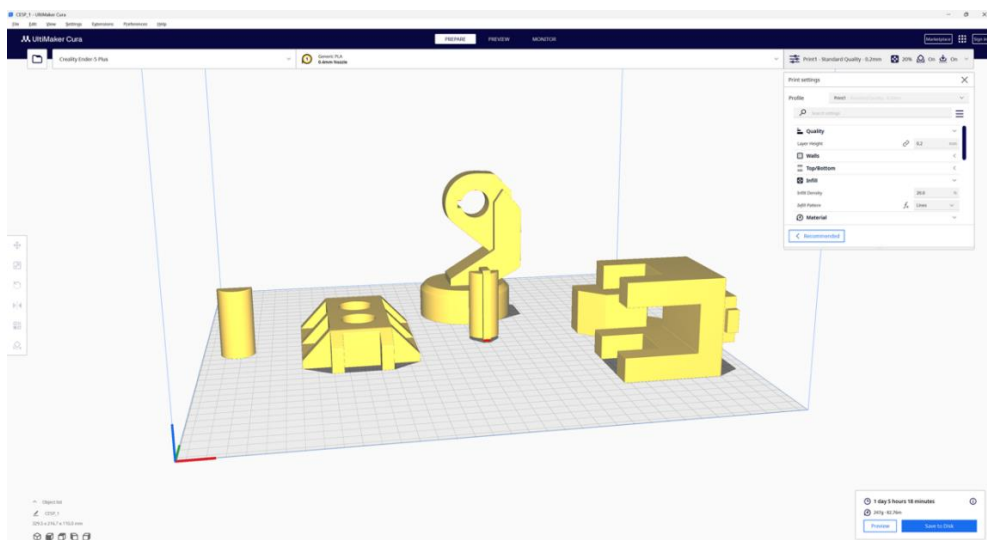


Рисунок 5.29 – Приклад імпорту моделі в середовище слайсеру

Слід зауважити, що у випадку некоректного налаштування масштабу моделей або його порушення під час процедури експорту, користувач має можливість здійснити остаточне коригування параметрів безпосередньо в програмному середовищі слайсера. Важливою особливістю роботи програм для слайсингу є автоматичне відключення функції згладжування (Smooth), яка в Blender забезпечувала візуальний ефект плавності поверхонь моделей завдяки алгоритмам рендерингу в реальному часі, створюючи ілюзію згладжених граней об'єкта. З огляду на зазначену особливість, рекомендується збільшувати параметри модифікатора Subdivision Surface під час експорту моделей та зменшувати їх інтенсивність при роботі над проектом з метою оптимізації використання обчислювальних ресурсів комп'ютера.

Програмне забезпечення містить набір інструментів трансформації, функціонально ідентичних до аналогічних засобів у Blender.

Після завершення всіх маніпуляцій з позиціонуванням та калібруванням розмірів моделі необхідно здійснити конфігурацію параметрів друку, які в подальшому можуть бути передані іншим операторам 3D-принтерів для забезпечення відтворюваності процесу виготовлення.

Первинним та найбільш критичним параметром є вибір типу філаменту, який здійснюється через відповідне меню у верхній частині інтерфейсу програми. У межах даного проекту буде використовуватися PLA-пластик, оскільки цей матеріал забезпечує оптимальні показники механічної міцності та довговічності готових виробів.

Наступним етапом є детальна верифікація налаштувань процесу друку, що включає перегляд та коригування технологічних параметрів та вимог до якості кінцевого продукту (рис. 5.30).

У рамках налаштування технологічних параметрів друку необхідно приділити увагу наступним критичним характеристикам:

Quality – рекомендується встановити значення 0,2 мм, що забезпечує оптимальний баланс між швидкістю виготовлення та якістю поверхні готового виробу.

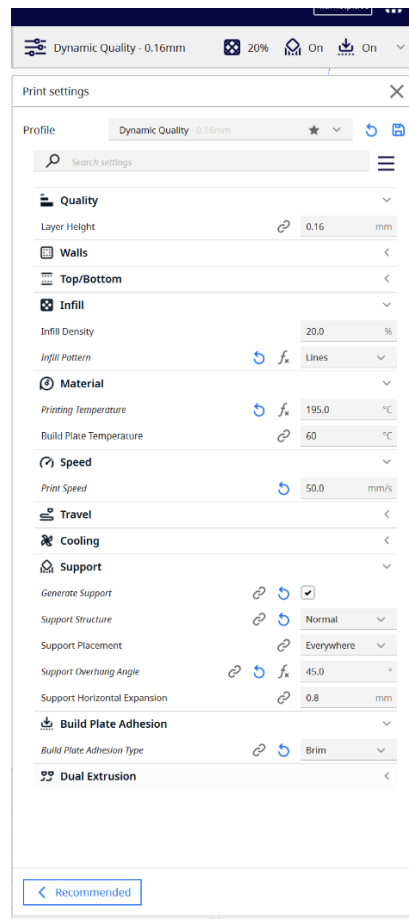


Рисунок 5.30 – Приклад частини налаштувань друку

Infill – параметр, що регулює внутрішню структуру об'єкта та відповідає за тип розподілу матеріалу між шарами моделі. Оптимальними налаштуваннями є 20% заповнення з використанням лінійного патерну (Lines).

Material – параметр температурного режиму, що визначає температуру плавлення філаменту. Для PLA-пластику рекомендується встановити температуру екструзії на рівні 195°C.

Support – з огляду на наявність нависаючих елементів конструкції необхідно активувати функцію "Generate Support", яка забезпечить автоматичне створення підтримуючих структур для елементів з критичними кутами нахилу.

Build Plate Adhesion – функція створення спеціалізованої адгезивної платформи, на якій формується модель, що полегшує процес відділення готового виробу від робочої поверхні принтера.

Після завершення конфігурації всіх технологічних параметрів необхідно активувати функцію "Slice", яка здійснить розрахунок часу виготовлення та маси готового елемента макету. Додатково користувач може перейти до вкладки "Preview" для візуального контролю згенерованих підтримуючих структур, а також використовувати функціональний слайдер у правій частині інтерфейсу для покрокової візуалізації процесу майбутнього друку (рис. 5.31).

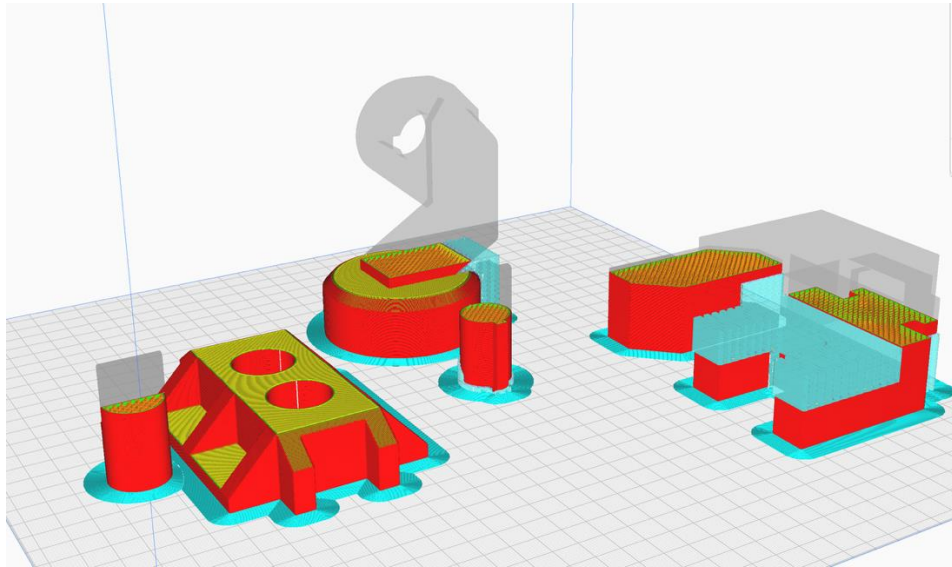


Рисунок 5.31 – Приклад візуалізації друку

Варто підкреслити, що програмне забезпечення надає можливість збереження файлу з усіма налаштованими параметрами друку, що забезпечує ефективну передачу технологічних даних третім особам та гарантує відтворюваність процесу виготовлення на різному обладнанні.

Додатковою функціональною перевагою є можливість одночасного завантаження множинних 3D-моделей для колективного друку в межах одного виробничого циклу. Така опція забезпечує суттєву оптимізацію часових ресурсів, усуваючи необхідність повторного налаштування параметрів для кожного окремого об'єкта, а також сприяє більш структурованому та систематизованому збереженню файлів проекту. Це рішення особливо ефективно при виготовленні серійних компонентів або елементів макету, що мають схожі технологічні вимоги до процесу друку.

6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

У процесі створення навчальної колекції 3D-моделей з інженерної графіки виникає потреба в економічному обґрунтуванні доцільності проєкту. Враховуючи зростаючу актуальність візуально-кінестетичних методів навчання в технічних ЗВО, проєкт має не лише соціальну, але й економічну перспективу.

Колекція має на меті розміщення в електронній бібліотеці та підготовлена для друку на 3D-принтері.

Проєктом передбачено створення 6 навчальних 3D-моделей, кожна з яких демонструє ключові поняття інженерної графіки: перетини, проєкції, перетворення. Моделі виготовляються методом 3D-друку з PLA-пластику.

Першочергово буде визначено собівартість розроблення колекції, після чого розраховується ціна.

Перевагою 3D-моделей є простота реалізації та швидкість друку готових матеріалів, що мають довгостроковий термін використання. Користування моделями не впливає на їх якість та термін придатності.

Моделювання продукту відбувається у Blender, це безкоштовне програмне забезпечення.

На сьогоднішній день на ринку практично відсутні аналоги кінестетичних моделей, спеціально адаптованих для використання у навчанні інженерної графіки. Через це інтерес з боку цільової аудиторії до розроблюваного комплексу є значним, що створює сприятливі умови для успішного впровадження та поширення даної продукції.

Прибутком для розробника є безпосередній продаж продукції, тобто комплект з шести моделей. Витрати розробника містять в собі витрати на розробку моделей. Джерелом фінансування є власний капітал розробника, що надалі може змінитись на відсоток від реалізації продукції.

Джерелом економії виступає довговічність моделей, це зумовлено тим, що комплект є електронною продукцією.

Порядок розробки комплекту кінестетичних 3D моделей складається з наступних етапів: створення креслень, розробка моделей по кресленням, підготовка моделей до друку. Основні витрати на розробку комплекту з шести моделей складаються з витрат на електроенергію.

Споживна потужність комп'ютера, що використовується для створення 3D-моделей дорівнює 0,5 кВт/год. Вартість електроенергії 4,32 грн/кВт. Час витрачений на створення моделей – 36 годин.

$$4,32 * 36 * 0,5 = 77,76 \text{ грн.}$$

Для реалізації проєкту необхідно задіяти 2х фахівців, а саме 3D-моделлера та оператора 3D-друку. Підготовкою до друку комплекту займається один оператор 3D-друку, а створенням ескізів та самих моделей для комплекту 3D-моделлер. 3D-моделлер на виконання своєї частини роботи, тобто створення ескізів, а після моделювання, витрачає 30 годин часу. Споживання ресурсу оператора 3D-друку для підготовки комплекту, становить 6 годин.

Мінімальна місячна заробітна плата оператора 3D-друку становить 8000,00 грн (48,00 грн/год), а 3D моделлера 10200,00 грн (60,00 грн/год).

Розрахунок основної заробітної плати наведено у таблиці 6.1.

За виконання роботи понад установлені норми, досягнення високих професійних результатів, а також за ініціативність, креативність та впровадження інновацій. До цієї категорії належать різноманітні доплати, надбавки, компенсаційні й гарантійні виплати, що передбачені чинним законодавством, а також премії за успішне виконання виробничих завдань і посадових обов'язків. У межах даного проєкту розмір додаткової оплати праці становить 25% від основної заробітної плати працівників.

$$2\ 064,00 * 0,25 = 516,00 \text{ грн.}$$

Таблиця 6.1 – Розрахунок витрат на заробітну плату

Етап	Вид робіт	Виконавець		Годинна ставка, грн	Тривалість виконання, днів	Заробітна плата, грн
		кількість, ос.	посада			
Початковий	створення креслень	1	3D-моделлер	60,00	1	480,00
Основний етап	розробка моделей по кресленням	1	3D-моделлер	60,00	2,5	1200,00
Заключний	підготовка до друку	1	оператор 3D-друку	48,00	1	384,00
Разом					6	2 064,00
Додаткова заробітна плата (25 %)						516,00
Усього						2 580,00

Єдиний соціальний внесок становить 22 % від суми заробітної плати та додаткової заробітної плати:

$$(2\,064,00 + 516,00) * 0,22 = 567,60 \text{ грн.}$$

Витрати на обслуговування техніки визначаються виходячи з її вартості та часу експлуатації, після закінчення якого, вона підлягає заміні (цей час, зазвичай, не перевищує 3-х років). Отже, враховуючи, що вартість комп'ютера дорівнює 35000,00 грн, а протягом року техніка використовується 254 робочих дні, отримаємо наступну суму витрат на обслуговування за час виконання проєкту:

$$(35000,00 / (3 * 8 * 254)) * 36 = 177,17 \text{ грн.}$$

Повна собівартість розробки колекції кінестичних моделей з інженерної графіки до моменту підготовки їх до друку складає:

$$2\,064,00 + 2\,580,00 + 567,60 + 77,76 + 177,17 = 3402,53 \text{ грн.}$$

Розрахуємо суму прибутку від реалізації розробки (виходячи з рівня рентабельності 20 %):

$$3\,402,53 * 0,2 = 680,51 \text{ грн.}$$

Розрахуємо ціну розробки комплекту 3D-моделей без податку на додану вартість (ПДВ):

$$3\,402,53 + 680,51 = 4\,083,03 \text{ грн.}$$

Розрахуємо суму ПДВ, що дорівнює 20 % від ціни без ПДВ:

$$4\,083,03 * 0,2 = 816,61 \text{ грн.}$$

Розрахуємо ціну з урахуванням ПДВ:

$$4\,083,03 + 816,61 = 4\,899,64 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків наведено у таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Розрахунок витрат на розробку комплекту кінестетичних 3D-моделей

№ з/п	Стаття витрат	Сума, грн
1	Основна заробітна плата	2 064,00
2	Додаткова заробітна плата	516,00
3	Єдиний соціальний внесок	567,60
4	Витрати на обслуговування техніки	177,17
5	Витрати на електроенергію	77,76
6	Собівартість розробки електронної бібліотеки 3D моделей	3 402,53
7	Прибуток	680,51
8	Ціна без ПДВ	4 083,03
9	Податок на додану вартість (ПДВ)	816,61
10	Ціна з урахуванням ПДВ	4 899,64

Отже, повна вартість розробки комплекту 3D-моделей складе 4 899,64 грн. Термін виконання усіх етапів розробки становить 4,5 дні для двох виконавців. Очікувана сума прибутку складає 680,51 грн, що свідчить про доцільність реалізації розробки.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи на тему "Колекція кінестетичних моделей з інженерної графіки" було досягнуто поставленої мети та вирішено всі визначені завдання дослідження.

Проведено комплексний аналіз кінестетичного навчання як педагогічної стратегії в сучасній освіті, що дозволив обґрунтувати доцільність використання тактильних моделей для вивчення інженерної графіки. Встановлено, що кінестетичні засоби навчання сприяють підвищенню ефективності засвоєння просторових концепцій на 15-25% та покращують розуміння складних геометричних взаємозв'язків на 20-30%.

Здійснено обґрунтований вибір програмного забезпечення для реалізації проекту: Blender 4.0 для 3D-моделювання як економічно ефективного рішення з необхідним функціоналом для створення точних геометричних моделей та Ultimaker Cura 5.10 для підготовки моделей до друку завдяки універсальності та якісним алгоритмам слайсингу.

Обґрунтовано вибір технології FDM (Fused Deposition Modeling) та PLA-пластику як оптимального поєднання доступності, безпеки та якості для освітніх цілей.

Створено колекцію з шести функціональних 3D-моделей, що демонструють ключові поняття інженерної графіки. Моделі розроблено з урахуванням специфічних вимог до кінестетичних навчальних матеріалів:

- забезпечена тактильна якість поверхонь для чіткого розпізнавання геометричних елементів;
- досягнута необхідна міцність для тривалого використання у навчальному процесі;
- реалізована функціональна взаємодія між елементами колекції.

Розроблені моделі відповідають усім технічним вимогам для 3D-друку. Проведений економічний аналіз підтвердив доцільність реалізації проекту.

Робота демонструє успішну інтеграцію сучасних технологій 3D-моделювання та друку в освітній процес, що відкриває нові можливості для підвищення ефективності викладання технічних дисциплін. Створені моделі можуть бути впроваджені в навчальних закладах різного рівня для покращення якості засвоєння інженерної графіки.

Результати роботи створюють основу для подальшого розвитку кінестетичних навчальних матеріалів. Перспективними напрямками є:

- розширення колекції моделями підвищеної складності;
- інтеграція з технологіями доповненої реальності;
- адаптація для інших технічних дисциплін;
- створення інтерактивних моделей з вбудованими датчиками.

Таким чином, поставлена мета кваліфікаційної роботи досягнута повністю. Створена колекція кінестетичних 3D-моделей є функціональним інструментом для підвищення ефективності навчання інженерної графіки та демонструє практичну цінність впровадження інноваційних технологій в освітній процес.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання. Вид. офіц. Київ, 2016. 31 с.
2. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Вид. офіц. Київ, 2016. 16 с.
3. User manual for Blender 4.4 URL: <https://docs.blender.org> (дата звернення: 27.05.2025).
4. Autodesk official community and problem-solving resources URL: <https://www.autodesk.com/community> (дата звернення: 27.05.2025).
5. 3D printing knowledge and latest updates for Ultimaker Cura URL: <https://ultimaker.com/learn/> (дата звернення: 27.05.2025).
6. Васильченко О.В. Основи архітектури та архітектурних конструкцій: навч. посіб. Харків 2007. 256 с.
7. Їлмаз Н., Теляшенко Я., Козуб П. Генератор 3D моделей. URL: <https://scigen3d.icfk.org> (дата звернення: 27.05.2025).
8. Методичні вказівки з виконання кваліфікаційної роботи для студентів денної та заочної форми навчання першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 186 "Видавництво та поліграфія" за освітньою програмою "Видавничо-поліграфічна справа" / В.П. Ткаченко, А.В. Бізюк, О.В. Вовк, І.М. Єгорова, В.Ф. Челомбітько. Харків: ХНУРЕ, 2020. 68 с.
9. Прахов А. Самовчитель blender 2.7. Київ - Україна : ТД, 2016. 400 с.
10. Чеботарьова І. Системи управління кольором: конспект лекцій. Харків : ХНУРЕ, 2016. 102 с.
11. Horvath J., Cameron R. Mastering 3D printing: a guide to modeling, printing, and prototyping. New York : Apress L. P., 2020. 347 p.
12. M. G. Introduction to blender 3.0. learn organic and architectural modeling, lighting, materials, painting, rendering, and compositing with blender. New York : Apress, 2022. 466 p.