

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

(повне найменування факультету)

Кафедра комп'ютерної інженерії та кібербезпеки

(повне найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ
КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗАСОБАМИ BLENDER 3D**

**SIMULATION MODEL OF THE PROCESS OF FORMING
COMPOSITE MATERIALS BY MEANS BLENDER 3D**

спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма Комп'ютерна інженерія

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи КІ-41
Биков Сергій Олегович

(підпис)

Керівник:
к.т.н., доцент
Багнюк Наталія Володимирівна

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
« » червня 2024 р.
Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
Лавренчук Світлана Василівна

(підпис)

Луцьк – 2024 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра комп'ютерної інженерії та кібербезпеки

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 12 Інформаційні технології

Спеціальність: 123 Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: «Комп'ютерна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

проф. Н.Черняшук

« 10 » 01 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Бикову Сергію Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи Імітаційна модель процесу формування композиційних матеріалів засобами Blender 3D

Керівник роботи к.т.н., доцент Багнюк Наталія Володимирівна

затверджені наказом закладу вищої освіти від «30» грудня 2023 року № 459/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи 11.06.2024р.

3. Вихідні дані до роботи Наукові публікації, літературні джерела; інтернет-ресурси з гитань імітаційного моделювання технологічних процесів; програмне забезпечення Digital Microscope Magnifier 500X

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Вступ

Аналіз предметної області імітаційного моделювання технологічних процесів

Матеріали, способи та методи моделювання

Розробка програми імітації технологічного процесу

Висновки

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
Аналіз предметної області імітаційного моделювання технологічних процесів	Багнюк Н.В., доцент		
Матеріали, способи та методи моделювання	Багнюк Н.В., доцент		
Розробка програми імітації технологічного процесу	Багнюк Н.В., доцент		
Нормоконтроль	Багнюк Н.В., доцент		
Гарант ОП	Лавренчук С.В., доцент		
Показник запозичень тексту	_____ %		
Академічна доброчесність	Міскевич О.І., асистент		

7. Дата видачі завдання 10.01.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1 Аналіз предметної області імітаційного моделювання технологічних процесів	до 15.02.2024 р.	Виконано
2.	Розділ 2. Матеріали, способи та методи моделювання	до 15.03.2024 р.	Виконано
3.	Розділ 3. Розробка програми імітації технологічного процесу	до 04.05.2024 р.	Виконано
4.	Висновки та пропозиції	до 07.05.2025 р.	Виконано
5.	Формування списку використаних джерел	до 10.05.2024 р.	Виконано
6.	Формування додатків	до 15.05.2024 р.	Виконано
7.	Оформлення ілюстративного матеріалу	до 20.05.2024 р.	Виконано
8.	Нормоконтроль	до 01.06.2024 р.	Виконано
9.	Інструментальна перевірка на академічний плагіат	до 04.06.2024 р.	Виконано
10.	Представлення кваліфікаційної роботи бакалавра до захисту	до 11.06.2024 р.	Виконано

Здобувач вищої освіти

_____ (підпис)

Биков С.О.

_____ (прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

_____ (підпис)

Багнюк Н.В.

_____ (прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Биков С.О. Імітаційна модель процесу формування композиційних матеріалів засобами Blender 3D. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Комп'ютерна інженерія» спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2024. 58 с.

Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел.

У першому розділі проведено аналіз питань комп'ютерного імітаційного моделювання композиційних матеріалів та аналіз математичних моделей для опису поведінки динамічних систем. Розглянуто питання валідації даних, сформовано алгоритм імітаційного моделювання.

В другому розділі проведено мікроскопію зображень методом Digital Microscope Magnifier 500X, досліджено порогування зображень та обчислено фактори нерівності засобами ImageJ, побудована математична модель та поверхні відгуку моделі, визначено способи проектування текстур та рендерингу в Blender.

Третій розділ присвячено формуванню 3D елементів, проектуванню меню та додатку в Unity, документуванню, компіляції та тестуванню роботи програми.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, формування матеріалів, симуляція технологічного процесу, Blender, Unity.

ANNOTATION

Bykov S.O. Simulation model of the process of forming composite materials using Blender 3D. Manuscript.

Bachelor's qualifying thesis of the OP «Computer Engineering» specialty 123 Computer Engineering. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2024. 58 p.

The qualification work consists of an introduction, three sections, conclusions, and a list of used sources.

In the first chapter, an analysis of computer simulation modeling of composite materials and analysis of mathematical models for describing the behavior of dynamic systems is carried out. The question of data validation was considered, and the simulation modeling algorithm was formed.

In the second chapter, image microscopy was carried out using the Digital Microscope Magnifier 500X method, image thresholding was investigated and disequilibrium factors were calculated using ImageJ tools, a mathematical model and response surfaces of the model were built, and methods of texture design and rendering in Blender were determined.

The third chapter is devoted to the formation of 3D elements, designing the menu and the application in Unity, documenting, compiling and testing the operation of the program.

Keywords: computer modeling, material formation, technological process simulation, Blender, Unity

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ.....	9
1.1 Теоретичні дослідження питань комп’ютерного моделювання.....	9
1.2 Огляд матеріалів та досліджуваних процесів	15
1.3 Аналіз математичних моделей для опису поведінки динамічних систем	20
1.4 Валідація даних імітаційного моделювання.....	24
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ, СПОСОБИ ТА МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ	27
2.1 Композиційні матеріали та їх характеристики.....	27
2.2 Використання експериментально отриманих даних для побудови математичної моделі	34
2.3 Способи проектування текстур та рефлексії в Blender 3D	36
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ПРОГРАМИ ІМІТАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	44
3.1 Формування 3D елементів системи.....	44
3.2 Проектування меню та взаємодія об’єктів	48
3.3 Документування, збірка та тестування програми	51
ВИСНОВКИ.....	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	55
ДОДАТКИ.....	59

ВСТУП

Актуальність теми. Моделювання технологічних процесів є важливим інструментом для сучасних підприємств, що дозволяє їм бути більш конкурентоспроможними, ефективними і безпечними. Це питання є актуальним через постійний розвиток технологій і зростання вимог до якості, ефективності та стійкості виробничих процесів. Завдяки моделюванню компанії можуть експериментувати з новими технологіями і процесами віртуально, без необхідності затратних фізичних експериментів. Це сприяє швидшому впровадженню інновацій і зменшенню ризиків.

Метою роботи є створення імітаційної моделі процесу формування композиційних матеріалів.

Об'єкт дослідження – процес формування композиційних матеріалів

Предмет дослідження – моделювання і програмна реалізація процесу формування композиційних матеріалів.

Завдання, які необхідно виконати:

- дослідити теоретичні питання щодо способів комп'ютерного моделювання технологічних процесів, програмне забезпечення для створення 3D моделей і з'ясувати, які фактори варто врахувати при створенні імітаційної моделі, обрати пристрої та рушії;

- сформулювати математичний опис моделі динамічного процесу формування композиційного матеріалу та визначити параметри коефіцієнтів впливу;

- сформулювати алгоритм імітаційного моделювання і визначити засоби і інструменти, які необхідні для його виконання;

- виконати мікроскопію зразків матеріалів, порогоування зображень та визначити показники фактору нерівності форм;

- сформулювати 3D елементи, розробити додаток для відтворення симуляцій технологічного процесу та протестувати його роботу.

Апробація. Багнюк Н. В., Христинець Н. А. Биков С. О. Розробка мультимедійних 3D моделей для симуляції технологічного процесу. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2024. №55. С. 12-17. (Додаток А)

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

1.1 Теоретичні дослідження питань комп'ютерного моделювання

У сучасному світі виробничі потужності, технології виготовлення та матеріали розвиваються стрімко, прогресивно, із застосуванням широкого спектру інноваційних підходів і методик. Кожна із складових технологічного процесу визначається інноваціями, цифровими технологіями, стійкістю до змін та конкуренції, та водночас спрямована на підвищення продуктивності, якості та стійкості виробництв.

Комп'ютерне моделювання дозволяє, перш за все, аналізувати та передбачати поведінку складних систем, оскільки часто запуск новітнього технологічного процесу з урахуванням інноваційних матеріалів – це надто дорогавартісний процес, що потребує не лише витрат на виробничі складові, а й залучення людських ресурсів. Крім того, часто такі процеси виконуються в складних, або небезпечних середовищах. Також сучасні технологічні процеси можуть бути дуже складними, з великою кількістю параметрів та взаємозв'язків. Розробка адекватних моделей для таких систем може бути складною та вимагати значних обчислювальних ресурсів. Тому, їх моделювання та імітаційна поведінка є необхідною умовою. З іншого боку, збільшення складності моделей призводить до потреби вдосконалити техніки оптимізації процесів моделювання, щоб забезпечити ефективне використання обчислювальних ресурсів та швидку ітерацію, що ставить нові виклики до комп'ютерного обладнання для реалізації моделі. З розвитком технологій різного роду з'являються і нові виклики, що потребують уваги та вирішення. Мається на увазі той факт, що вимоги до точності та реалізму моделей постійно зростають, особливо у високоточних сферах, таких як медицина, наука про матеріали та інженерія.

Широкої популярності у сучасних виробництвах набувають процеси формування нових, або покращених матеріалів, для подальшого ї застосування у різних галузях науки і техніки. Серед таких матеріалів – композиційні, тобто

«матеріали з новим корисним комплексом фізико-механічних та експлуатаційних властивостей, утворені поєднанням двох і більше компонентів, які мають межі розподілу та різняться хімічним складом, структурою і фізико-хімічними характеристиками» [1]. Загалом, з огляду різних джерел щодо способів комп'ютерного моделювання була сформована модель (рис. 1.1), яка включає обов'язкові компоненти у вигляді фізичної, логічної, графічної, розрахунково-математичної та імітаційної складових.

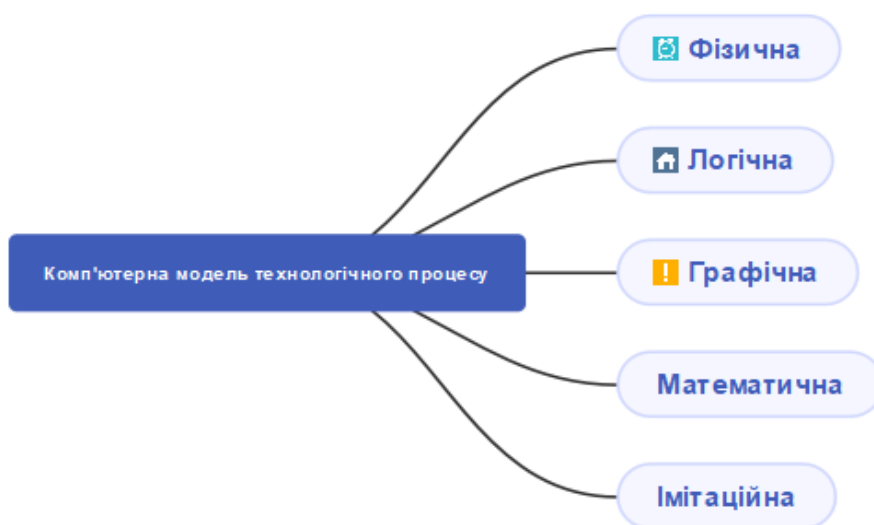


Рисунок 1.1 – Загальна схема комп'ютерної моделі технологічного процесу

Моделювання параметрів композиційних матеріалів успішно займаються науковці Луцького національного технічного університету на кафедрах технологій легкої промисловості, харчових технологій та хімії, матеріалознавства, прикладної механіки та мехатроніки такі науковці, як Дударев І. М., Імбірович Н. Ю., Кашицький В. П., Мельничук М. Д., Пастернак В. В., Повстяной О. Ю., Придальний Б. І., Редько Р. Г., Рудь В. Д., Садова О. Л., Ткачук О. Л. та інші вчені [2-6]. Серед українських дослідників у галузі моделювання технологічних процесів варто зазначити також публікації Ігнат'євої В. В., Педана Є. В., Мікосянчик О. О., Мнацаканова Р. Г., Яганова П. О. та інших [7-9]. Ці науковці досліджували композиційні матеріали та програмували їх поведінку в основному або засобами Visual Studio (VS), або MATLAB/Simulink, чи за допомогою інших інтегрованих середовищ розробки. З огляду розглянутих джерел можна зробити висновок, що

використання програмних засобів для моделювання та програмування поведінки матеріалів є досить поширеним у наукових дослідженнях в області матеріалознавства та інженерії матеріалів. Однак, нас цікавить не лише програмна модель, а й візуальна емуляція технологічного процесу, тобто наочна 3D-модель поведінки системи.

В роботах [10-11] досліджувались моделі поведінки частинок матеріалів, проте усі вони передбачають ідеалізовану форму гранул (рис. 1.2), що, в принципі, не зустрічається в реальних експериментах.

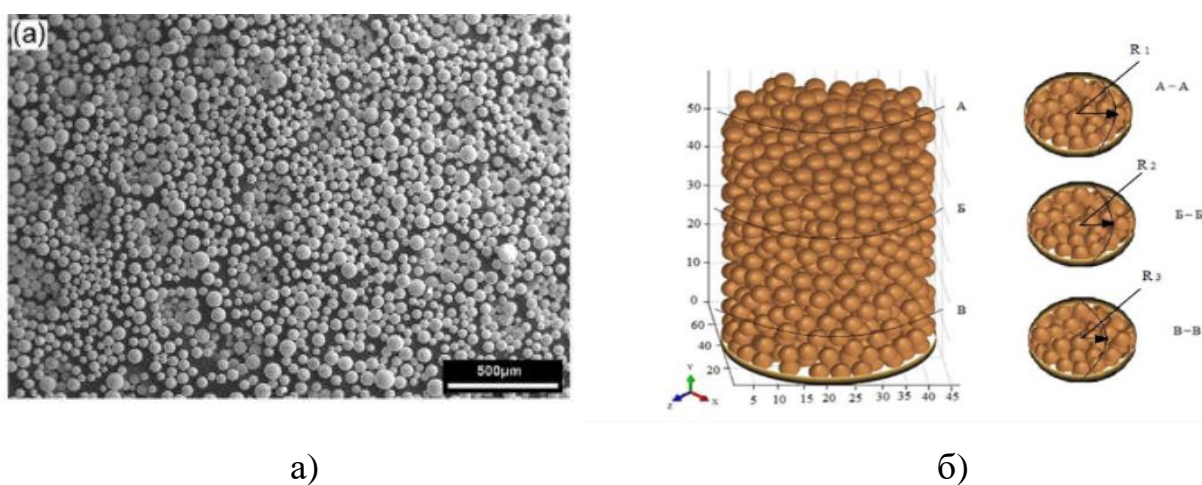


Рисунок 1.2 – Моделювання процесу формування частинок матеріалів: сферодизованих (а) однорідних сумішей [10] та монодисперсних (б) структур [11]

В розглянутих теоретичних моделях частинки матеріалів представлені, як ідеалізовані сферичні об'єкти, або гранули з рівномірним розподілом розмірів. Однак, у реальних експериментах частіше зустрічаються більш складні та нерегулярні форми гранул, такі як агломерати, підвішені частинки, або навіть аморфні матеріали. Це може впливати на результати експериментів та точність теоретичних моделей. Тому важливо враховувати ці фактори при аналізі та порівнянні теоретичних прогнозів з експериментальними даними, що і завданням кваліфікаційної роботи.

У працях закордонного дослідника, професора Jianjun Lin з університету Хохай (Китай), проведені дослідження з комп'ютерного імітаційного моделювання процесів пакування матеріалів в кубічні контейнери [12-13]. Схематичні

зображення геометричних моделей композиційних матеріалів, побудованих ним зі структурованих частинок сформовані у вигляді сфер, витягнутих еліпсоїдів, сплюснених еліпсоїдів, сферо-циліндрів, тетраедрів, гексаедрів, октаедрів тощо (рис. 1.3). У статтях цього дослідника не вказано тип програмного забезпечення, лише зазначено, що «процеси реалізуються за допомогою нашого власного програмування, а чисельні результати отримані за допомогою комп'ютерної техніки». Оскільки, не зазначені лінки на програмні продукти, можемо зробити припущення, що розробка досить індивідуальна, можливо створена в середовищі графічних додатків та не має універсального широкого застосування.

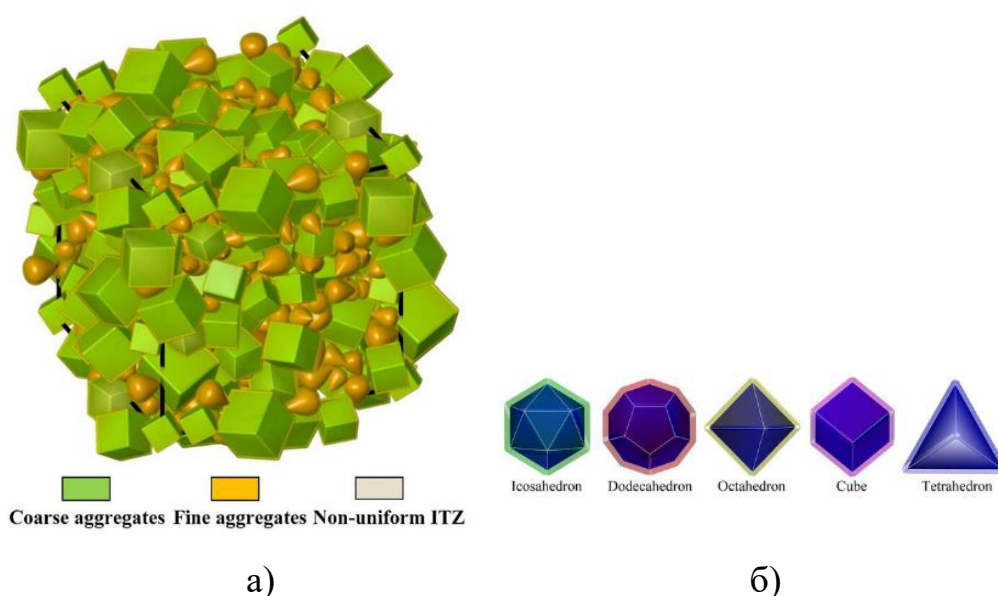


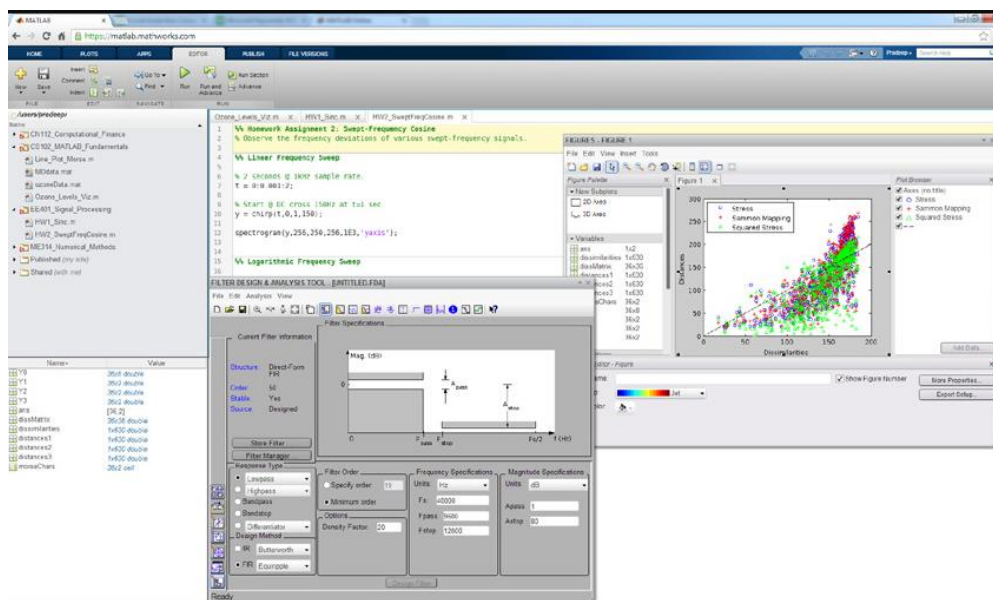
Рисунок 1.3 – Моделювання процесу поведінки тривимірних композитів (а), що складаються з частинок різних розмірів (б) [10]

В інтернет-джерелах з питань комп'ютерного моделювання знайдено кілька десятків ресурсів open source для створення імітацій фізичних, хімічних, технологічних процесів тощо, які можуть бути корисними для дослідження композиційних матеріалів та їх поведінки. Серед них – фреймворки, системи експериментальних досліджень математичних функцій, імітатори дискретних подій, тривимірні астрономічні програми та велика кількість симуляторів хімічних процесів. Більша частина програмного забезпечення для комп'ютерного моделювання є власницьким, умовно-відкритим, або комерційним продуктом.

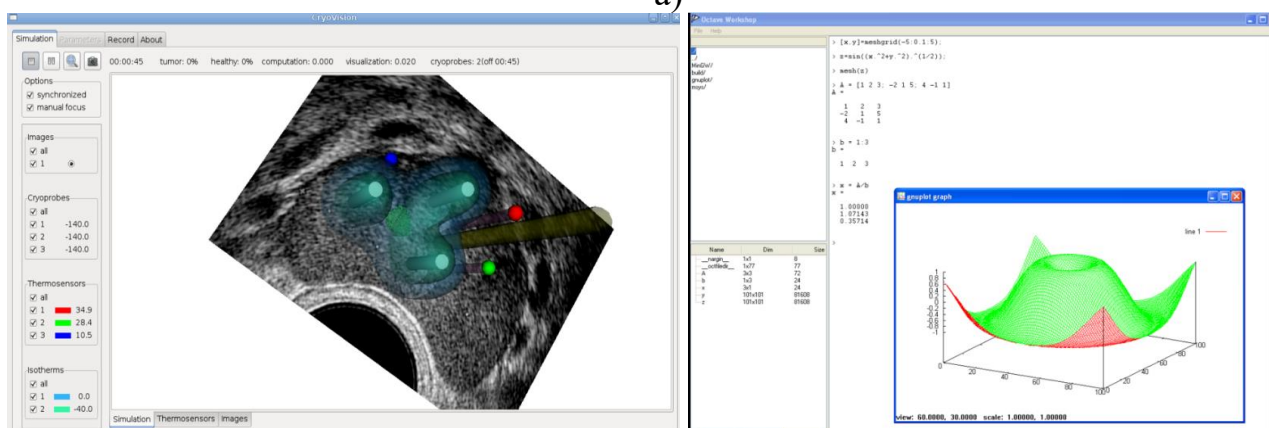
Найпопулярнішим програмним продуктом такого класу є, на нашу думку, MATLAB/Simulink [14]. Він надає широкий спектр можливостей для чисельних обчислень, включаючи моделювання, вирішення систем рівнянь, обробку сигналів та зображень, статистичний аналіз та багато іншого. Для MATLAB існує широкий вибір додаткових пакетів та бібліотек, які розширюють його функціональність та дозволяють вирішувати різноманітні завдання в різних областях науки, техніки та інженерії (рис. 1.4 а). Так, SimPowerSystems є пакетом для MATLAB/Simulink, спеціально розробленим для моделювання електричних систем та вирішення різних завдань у сфері електроенергетики. Варто зазначити суттєві особливості MATLAB, перша з яких та, що дана програма є комерційним продуктом, а друга, що моделювання поведінки різних матеріалів, чи частинок матеріалів, та ще й в 3D проекціях у даній програмі практично не реалізуються.

Розглянемо інші програмні продукти, що здатні реалізувати моделі поведінки фізичних і механічних систем. Для прикладу, платформа Advanced Simulation Library (ASL), як продукт ізраїльської компанії Avtech Scientific, застосовується у випадку моделювання процесів гідродинаміки та мультифізики [15]. У програмі реалізовано інтерфейс (рис. 1.4 б) для дослідження функцій ізотропних реакцій, пенопружності та ін. Пакет співпрацює на експорті з програмою MATLAB, але драйвери OpenCL мають обмежену підтримку функцій бібліотеки. Крім фізичного моделювання, пакет ASL може бути використаний для моделювання біологічних систем, таких як моделювання руху людського тіла, реакцій внутрішніх органів, взаємодії між клітинами та інших біомедичних досліджень. Також ця програма може слугувати інструментом для відеоігор, віртуальної реальності, візуалізації даних та інших областей комп'ютерної графіки.

Популярним проектом імітаційного моделювання є GNU Octave [16] зі зручним інтерфейсом (рис. 1.4 в) для розв'язання задач лінійного і нелінійного характеру, можливістю застосування мови програмування та середовища для виконання обчислень, схожих на ті, що пропонуються у MATLAB. GNU Octave має схожий синтаксис та функціональність з MATLAB, що дозволяє користувачам легко переходити з MATLAB на Octave та навпаки.



а)



б)

в)

Рисунок 1.4 – Інтерфейси програмних продуктів для імітаційного моделювання:
а) MATLAB [12], б) Advanced Simulation Library [15], в) GNU Oktave [16]

Цей програмний продукт має широкий спектр функцій для виконання числових обчислень, включаючи розв'язання лінійних та нелінійних систем рівнянь, обробку сигналів, обробку зображень, статистичний аналіз та інше. Крім того, він є безкоштовним програмним забезпеченням з відкритим кодом, що дозволяє користувачам використовувати, змінювати та розповсюджувати його без обмежень. З мінусів – це його швидкодія. У порівнянні з MATLAB, GNU Octave може бути менш ефективним з точки зору швидкодії виконання певних операцій через різницю в оптимізації та внутрішніх механізмах обчислень.

Окрім зазначених вище груп програм, існують і класичні способи імітаційного моделювання – використання мов програмування, наприклад, C++, C# у середовищі MS Visual Studio, чи Python з бібліотеками NumPy, SciPy, Matplotlib та іншими. І хоча Python став дуже популярною мовою для наукових обчислень через свою простоту використання та широкий вибір бібліотек, проте, для моделювання динамічних процесів у галузі вивчення матеріалів і їх структур, він, скоріше, не зовсім ефективний.

Тобто, в результаті огляду наукових досліджень в напрямку моделювання технологічних фізичних процесів для поведінки композиційних матеріалів, а також з огляду програмного забезпечення у цій сфері, можна зробити висновок, що комп'ютерне емулювання фізичних процесів формування композиційних матеріалів не достатньо досліджене і потребує індивідуального підходу як з точки зору підбору візуальних середовищ, так і з точки зору підбору програмних середовищ.

1.2 Огляд матеріалів та досліджуваних процесів

Для емуляції процесів формування композиційних матеріалів було проаналізовано праці науковців, що займались процесами формування таких виробів. Так, в роботі [17] зазначено, що ключовим елементом створення композитів є їх формування, у результаті якого досягається щільність, пористість, міцність, проникність структур. З алгоритму технологічного процесу формування композиційного матеріалу, що розглянуто у роботі [18], було сформовано загальну схему формування (таблиця 1.1):

Таблиця 1.1 – Спрощений алгоритм формування композиційних матеріалів

№ п/п	Назва етапу формування
1	Підготовка матеріалів
2	Відновлення, сортування, модифікування
3	Математична модель, комп'ютерна імітація
4	Формування композитів
5	Контроль якості заготовок

Як видно з таблиці, комп'ютерна імітаційна модель займає провідне місце в загальному алгоритмі формування, тому поставлена мета кваліфікаційної роботи є обґрунтовано актуальною.

У якості матеріалів вибрано силікати H_2SiO_3 та підшипникову сталь марки ШХ9. Їх фізичні, хімічні і технологічні властивості, походження та методи відпалу і реставрації були досліджені у роботах [19-20] та не потребують детального розгляду в рамках цієї кваліфікаційної роботи, проте, мікроскопічний огляд структур цих матеріалів є необхідний для їх подальшого 3D-моделювання.

Мікроскопію матеріалів проведено за допомогою світлодіодної zoom-камери Digital Microscope Magnifier 500X (рис. 1.5)

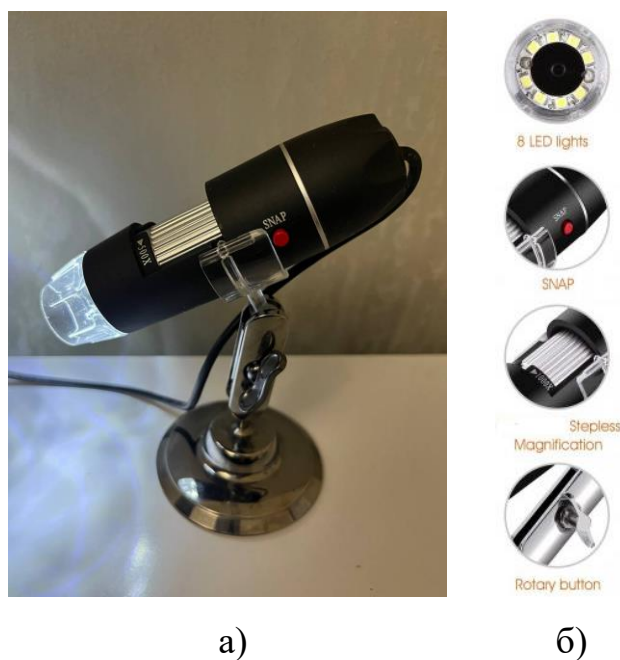


Рисунок 1.5 – Світлодіодна камера Digital Microscope Magnifier 500X (а)
та її компоненти (б) [21]

Цей пристрій використовує світлодіодне підсвічування, яке забезпечує рівномірне та яскраве освітлення об'єкта та вбудовану камеру для зображень. Діапазон збільшення зазвичай становить від 50 до 500 разів. Мікроскоп має USB-інтерфейс для підключення до комп'ютера, або іншого пристрою для передачі зображень або перегляду їх у реальному часі.

Загалом, це зручний інструмент для дослідження дрібних об'єктів та структур, в тому числі матеріалів сталі та кераміки. Технічні специфікації мікроскопу подано у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Технічні специфікації Digital Microscope Magnifier 500X [21]

Специфікація	Характеристики
Матриця	5 МП (інтерполяція 2МП)
Розширення	2560x2048 (5М), 2000x1600, 1600x1280 (2М), 1280x1024, 1024x960, 1024x768, 800x600, 640x480, 352x288, 320x240, 160x120
Фокусна відстань	Ручне налаштування від 10мм до 500 мм
Частота кадрів	Максимально 30 кадрів/с при освітленості 600 Лк
Збільшення	50x – 500x
Формат відео зображень	AVI
Формат фото зображень	JPEG, BMP
Підсвітка	8-світлодіодна
Інтерфейс	USB 2.0
Енергоспоживання	5В через USB порт
Мова інтерфейсу	англійська, німецька, іспанська, корейська, французька
Постачальник ПЗ	MicroCapture
Розміри	110мм (Д) x 33mm (Р)

Зазначені специфікації дозволяють відмінно визначати форми матеріалів, що мають розмірності у діапазоні від 0,5 до 14 мм.

Проведемо порівняння характеристик інтерфейсів популярних, на нашу думку, на сьогоднішній час 3D-редакторів: Autodesk Maya, Autodesk 3ds Max, Cinema 4D, Blender та Unity 3D.

Autodesk Maya [22] широко використовується в промисловому середовищі для створення анімаційних фільмів, відеоігор та спецефектів. Він має робочий простір, що базується на панелях інструментів та меню, з великою кількістю параметрів і налаштувань та включає ряд інструментів для створення та редагування складних рухів об'єктів.

Програма Autodesk 3ds Max [23] спеціалізується на моделюванні та рендерингу 3D-сцен. Вона має плаваючі панелі, які можна організувати в

залежності від потреб користувача і легко інтегрується з іншими програмами Autodesk, такими як Maya та AutoCAD.

Популярним серед розробників комп'ютерних моделей є продукт, відомий своєю дружньою для початківців інтерфейсом – Cinema 4D [24], який є досить модульним та здатним до індивідуальних налаштувань, щоб відповідати потребам користувача. Cinema 4D має ряд інструментів для створення анімацій та візуалізації.

Unity [25] відомий своєю спрощеною системою розробки ігор з графічним інтерфейсом (як 2D, так і 3D), має власний інтерфейс редактора, орієнтований на розробку ігрового контенту, такий як моделі, текстури, анімації та інші ресурси та може інтегруватися з різними іншими програмами для створення контенту, такими як Blender чи Maya.

Blender є безкоштовним програмним забезпеченням з відкритим кодом. Його інтерфейс має модульну структуру, що дозволяє користувачам налаштовувати розміщення та функціональність панелей інструментів та широкий спектр інструментів для моделювання, анімації, текстурування, освітлення та рендерингу.

Для того, щоб обрати редактор формування композиційних матеріалів для кваліфікаційної роботи, визначено усі переваги та недоліки зазначених вище редакторів та встановлено, що ряд з них, такі як Cinema 4D, Autodesk Maya та Autodesk 3ds Max є комерційним програмним забезпеченням, тобто його потрібно придбати або підписати на платну підписку для використання. Крім того, в порівнянні з деякими іншими програмами, такими як Blender чи Unity вони мають меншу спільноту користувачів і менше доступних онлайн-ресурсів для навчання і підтримки. Тому, з урахуванням цього, нами обрано наступні програмні продукти для створення комп'ютерної імітаційної моделі: Unity та Blender.

Для емуляції 3D-частинок матеріалів використано програму Blender [26], яка має значні переваги перед вище згаданими у оглядовому розділі кваліфікаційної роботи. Це вільно-поширюваний програмний пакет для моделювання, анімації, рендерингу та створення інтерактивних 3D-зображень і анімації. Він широко використовується для різноманітних завдань, включаючи емуляцію 3D-об'єктів та процесу формування матеріалів.

Blender має вбудований рендерер Cycles, який забезпечує високоякісний фотореалістичний рендеринг розробок, як на рисунку 1.6. Крім того, він підтримує рендерер Eevee для реального часу та інтерактивного перегляду сцен. Для симуляції матеріалів у програмі Blender використовуються матеріали та текстури. Це дозволяє створювати різні візуальні ефекти, такі як текстури, блиск, прозорість, просвітлення тощо.

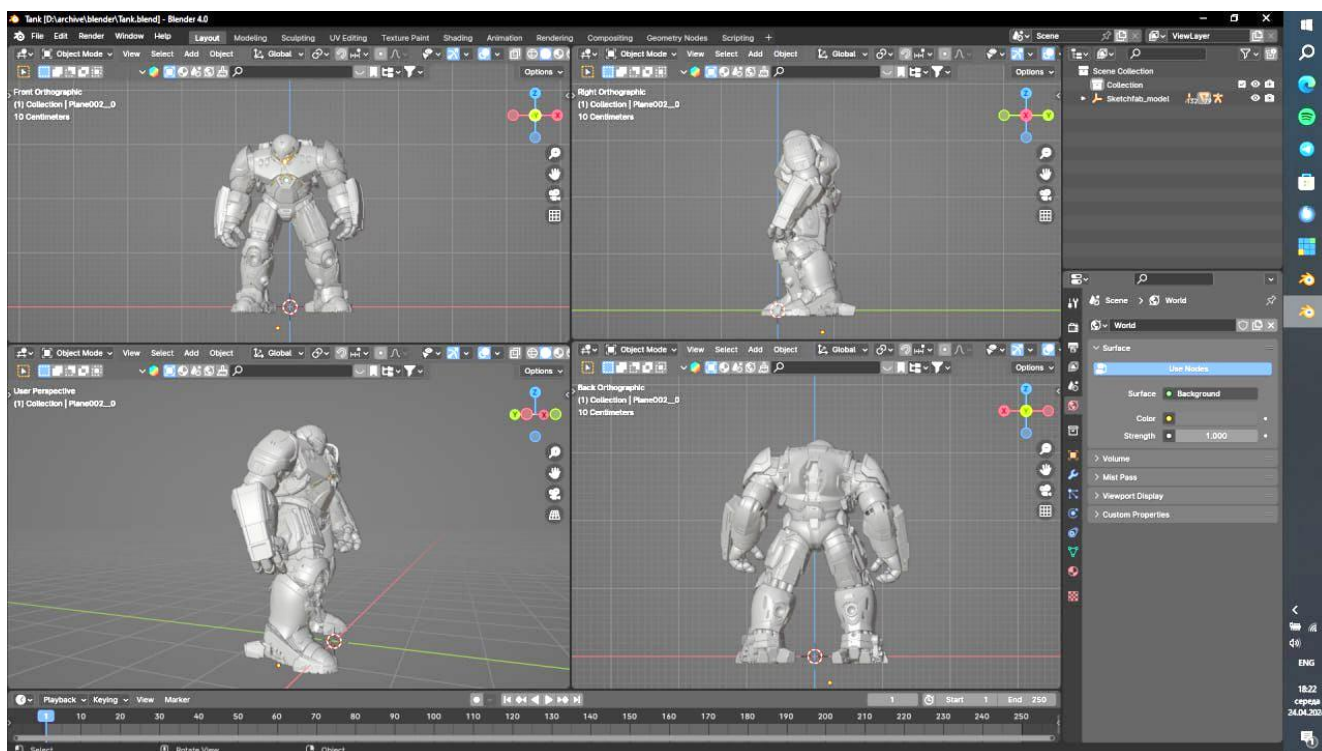


Рисунок 1.6 – Розробка 3D-об’єктів у Blender

Для автоматизації процесу формування матеріалів використано програмне середовище Unity, яке буде використане для автоматизації процесу формування матеріалів та програмування поведінки об’єктів. Наприклад, у ньому можна імпортувати 3D-моделі та створювати скрипти, що визначають їхню поведінку, і далі використовувати різні компоненти Unity для розміщення цих моделей в циліндричних контейнерах або в будь-якій іншій формі. Після цього можна створити готовий програмний продукт, який буде використаний для автоматизації процесу формування матеріалів відповідно до мети кваліфікаційної роботи.

1.3 Аналіз математичних моделей для опису поведінки динамічних систем

В роботі передбачено модель динаміки завантаження матеріалів в контейнери для подальшого їх формування згідно технологічного процесу. Спочатку потрібно оцінити розрахунки щодо кількості матеріалів, їх форми, обрати форму контейнера тощо.

Тобто, перед початком імітаційного моделювання формують математичну модель поведінки, а потім проектують згідно зафіксованих у моделі параметрів. Оскільки це динаміка, а динамічні процеси поведінки сипких середовищ в реальних коефіцієнтах змодельовати важко (якщо не неможливо). Тому, будемо використовувати методи стохастичного моделювання.

Тобто, підходящим методом для цього може бути стохастичне моделювання, яке дозволяє враховувати випадкові фактори і елементи невизначеності у процесі.

Розглянемо математичні моделі, які застосовуються для опису поведінки багатокомпонентних систем у процесі їх автоматизації. До таких відносять методи Чебишева, Гаусса, Ньютона – Котеса, Монте-Карло, чисельного диференціювання таблично та аналітично заданих функцій а інші.

Моделювання методом Монте-Карло є широко використовуваним інструментом для розв'язання різноманітних задач, включаючи стохастичні проблеми, такі як динаміка завантаження матеріалів в контейнери [27].

Основна ідея цього методу полягає в тому, що замість аналітичного розв'язання складних математичних рівнянь використовуються випадкові числа для симулювання випадкових процесів. Цей метод дозволяє отримати апроксимовані результати шляхом проведення великої кількості експериментів, його називають методом чисельного інтегрування.

Алгоритм обчислення визначеного інтегралу за методом Монте-Карло передбачає генерацію n послідовності випадкових чисел x_i з деякої множини X за законом розподілу $f_x(x)$ та обчислюється за формулою (1.1).

$$m_y = \int_a^b f(x)dx = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (1.1)$$

де y_i – функція перетворення випадкових чисел $y_i = \varphi(x_i)$.

Оцінка похибки методу Монте-Карло часто базується на формулі стандартного відхилення, яка залежить від обсягу вибірки та інших параметрів генерації псевдовипадкових чисел та обчислюється за формулою (1.2).

$$\Delta = \frac{1}{2\sqrt{n(1-P)}}, \quad (1.2)$$

де P – імовірність того, що похибка впадеться в заданий інтервал $[-\Delta; +\Delta]$.

Зазвичай, чим більше точок вибірки, тим менша похибка, але іноді похибка генерації псевдовипадкових чисел може впливати на загальну точність результату.

Метод Монте-Карло є ефективним для обчислення багатократних інтегралів, оскільки кількість випробувань (або точок) не залежить від кратності інтегралу. Це означає, що можна застосувати цей метод для обчислення інтегралів складених функцій або інтегралів по складних областях, і кількість необхідних випробувань буде лише залежати від точності, яку потрібно досягти.

Розглянемо наступний метод математичного прогнозування – моделювання методом симетричного композиційного плану [28]. Цей метод експериментального планування, який використовується для дослідження впливу декількох факторів на досліджувану систему або процес. У ньому фактори поділяються на групи, а кожна група має бути збалансована, тобто кожен фактор має однакову кількість рівнів у кожній групі.

Нехай під час проведення експерименту вивчається вплив набору факторів a_1, a_2, a_3 на невідому функцію $X = f(a_1, a_2, a_3)$. Метою цього дослідження є створення математичної моделі за композиційним планом. Таблиця рівнів та факторів такої кількості умов варіювання виглядає наступним чином (табл. 1.3):

Таблиця 1.3 – Варіювання значень трьохфакторного експерименту за симетричним композиційним планом

Рівні факторів	a1	a2	a3
Основний рівень (a_{i0})	t ₁₀	t ₂₀	t ₃₀
Інтервал варіювання (Δa_i)	Δt_{10}	Δt_{20}	Δt_{30}
Верхній рівень ($a_i = +1$)	+1	+1	+1
Нижній рівень ($a_i = -1$)	-1	-1	-1

Отримати математичну модель у вигляді рівняння регресії другого порядку означає знайти вираз, який описує залежність між вхідними факторами a_1, a_2, a_3 та вихідною змінною X . Такий вираз описується формулою (1.3):

$$X = \beta_0 + \beta_1 a_1 + \beta_2 a_2 + \beta_3 a_3 + \beta_{11} a_{12} + \beta_{22} a_{22} + \beta_{33} a_{32} + \beta_{12} a_1 a_2 + \beta_{13} a_1 a_3 + \beta_{23} a_2 a_3 + \varepsilon \quad (1.3)$$

де X – вихідна змінна (результат експерименту);

a_1, a_2, a_3 – вхідні фактори (змінні, які досліджуються) ;

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ – коефіцієнти, які відображають вплив кожного фактора на вихідну змінну та зсув (або середнє значення) ;

$\beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}$ – коефіцієнти, які відображають квадратичний вплив кожного фактора;

$\beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}$ – коефіцієнти взаємодії між факторами;

ε – випадкова складова.

Метою є підбір коефіцієнтів β , які найкраще адаптуються до реальних даних. Для цього використовують методи регресійного аналізу, а після цього використовується метод складання плану, щоб розподілити комбінації рівнів факторів між різними експериментальними точками.

Симетричний композиційний план дозволяє зменшити варіацію результатів експерименту шляхом балансування розподілу факторів, і це дозволяє зробити оцінку впливу кожного фактора більш точною та надійною.

Наступним стохастичним методом оцінки поведінки динамічної системи можуть виступати графи взаємодії складових системи, що описуються рівняннями Колмогорова [27].

Суть методу в наступному: для опису поведінки системи, такої, як, наприклад, суміші порошків у контейнері з використанням ймовірнісних методів, узагальнено її можна представити за допомогою диференціальних рівнянь Колмогорова, з урахуванням певних припущень. Зокрема, при дослідженні деяких дискретних станів системи припускають, що перехід системи з одного стану в інший можливий у будь-який момент часу і може бути описана графом (рис. 1.7).

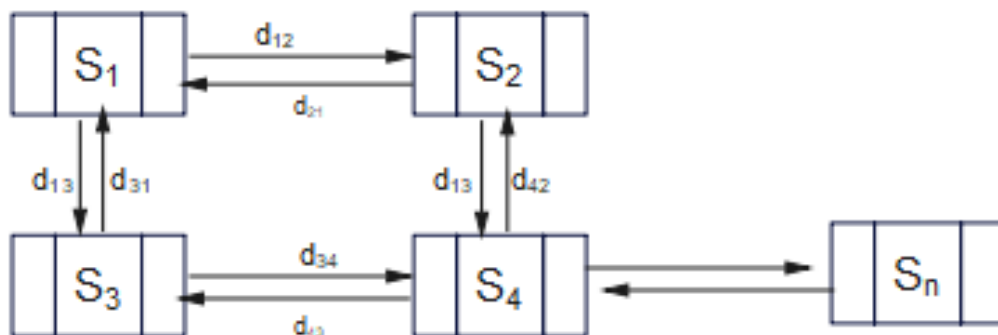


Рисунок 1.7 – Графи дискретних станів

Якщо представити функцією $S_i(t)$ імовірність того, що в проміжку часу t система S перебуватиме в деякому стані S_i , то, для будь-якого моменту часу t сума ймовірностей всіх станів дорівнює 1 згідно з формулою (1.4):

$$\sum_{i=1}^n S_i(t) = 1 \quad (1.4)$$

Виконавши певного роду перетворення: приріст функції часу до Δt , у результаті отримаємо деяку систему диференціальних рівнянь, яка описує стан системи, а інтегрування цих рівнянь дозволяє отримати шукані ймовірності станів системи. Показники d_{ij} інтенсивності потоків переходу із стану в стан мають стохастичний характер.

Таким чином, математичний опис моделі динамічного процесу за запропонованими методами матиме імовірнісні коефіцієнти. Точність моделі, яку вони передають, залежить від того, наскільки добре вони відображають реальну варіабельність або непередбачувані зміни в системі.

1.4 Валідація даних імітаційного моделювання

У процесі імітаційного моделювання важливо перевірити, наскільки точно та адекватно комп'ютерна модель відтворює реальну поведінку. Для цього важливо провести валідацію даних. Цей процес полягає у порівнянні результатів, отриманих від комп'ютерної моделі, з реальними даними або спостереженнями. Валідація даних допомагає переконатися в тому, що модель відтворює реальність достатньо точно та адекватно. Це важливо для того, щоб мати впевненість у надійності та придатності моделі для прийняття рішень або проведення прогнозів.

Для успішної валідації перш за все потрібно провести збір реальних даних, які будуть використовуватись, як основа для порівняння з результатами комп'ютерної моделі. Сама розробка передбачає використання програмного забезпечення Blender і Unity, які відомі своїми потужними можливостями в галузі 3D-моделювання та анімації. Ця модель повинна відображати всі важливі аспекти та взаємодії, що відбуваються у реальному світі. Після розробки моделі, її результати порівнюються з реальними даними або спостереженнями. Це передбачає порівняння графіків, діаграм, статистичних показників тощо. Якщо є різниця між результатами комп'ютерної моделі та реальними даними, проводиться аналіз цієї різниці для виявлення причин таких відхилень та виправлення моделі, якщо це необхідно.

Після внесення корекцій у модель та повторного порівняння результатів з реальними даними перевіряється адекватність моделі. Методи визначення адекватності математичних моделей передбачають визначення статистичної значимості залежності між змінними для порівняння середніх значень двох, або більше груп. Один з найпоширеніших способів визначення адекватності моделі полягає в порівнянні її прогнозів з реальними експериментальними даними. Якщо

модель добре передбачає результати експериментів, то це свідчить про її адекватність. Якщо результати відповідають очікуванням і показують задовільну відповідність, то модель вважається валідованою.

Усі кроки валідації даних та результати порівняння використовуються для подальшого аналізу та звітності. Практично валідація даних у процесі імітаційного моделювання включає наступні кроки загального алгоритму, які зазначені у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Етапи імітаційного моделювання

№	Етапи комп'ютерно-імітаційної моделі	Формулювання завдань	Засоби та інструменти
1	Збір реальних даних	Оцінка експериментальних даних, визначення розмірів частинок, які підлягають моделюванню	Мікроскопія зразків, Digital Microscope Magnifier 500X, розрахунки форм-факторів частинок
2	Розробка комп'ютерної моделі	Розробка 3D-об'єктів, імітація процесу формування композитів	Blender
3	Створення програми	розробка імітаційної програми симуляції засипки матеріалів в контейнері	Unity
4	Зіставлення моделі з реальними даними	Оцінка технологічних параметрів земульованих зразків	Digital Microscope Magnifier 500X
5	Підтвердження адекватності моделі	Обґрунтування адекватності показників	Аналітичні розрахунки, валідація
6	Документування процесу	Створення інструкції користувача	Текстова документація, Unity

Ці кроки дозволяють забезпечити повний процес комп'ютерної імітації технологічного процесу та відтворювати формування максимально точно, що дозволить використовувати модель для прийняття обґрунтованих рішень або прогнозування подій.

Тобто, в процесі верифікації уже сформованої комп'ютерної моделі проводиться аналіз її чутливості та перевірка відповідності вихідних даних моделі тим, що очікується від реальної системи. Якщо така система існує, то застосовуються статистичні методи для порівняння вихідних даних моделі з реальними даними.

Етапи імітаційного моделювання, які зазначені в таблиці вище, допомагають переконатися в тому, що запрограмована модель вірно відтворює поведінку реальної системи або даних, на яких вона базується. Такий аналіз і валідація є важливими для забезпечення достовірності та надійності моделі під час її подальшого використання.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ, СПОСОБИ ТА МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ

2.1 Композиційні матеріали та їх характеристики

В кваліфікаційній роботі проведено комп'ютерне моделювання композиційних матеріалів, які складаються з частинок різного розміру. Тому, важливо враховувати не лише самі розміри частинок, але й їхню форму, а також співвідношення між ними. Це включає комбінацію частинок різних геометричних форм, таких як сферичні, циліндричні, кубічні і т. д. У моделюванні таких матеріалів важливо правильно відобразити розміри і форми кожної частинки, а також їхнє розташування та взаємодію одна з одною. Наприклад, різні розміри частинок можуть впливати на їхню спроможність утворювати компактні або пористі структури, а також на фізичні властивості матеріалу, такі як проникність, міцність тощо. Пористість структури таких матеріалів досліджена в наукових дослідженнях [29-30] та буде використана на етапі валідації даних сформованої моделі.

Отже, при моделюванні композиційних матеріалів з частинками різного розміру важливо докладно вивчити характеристики кожної частинки та їх взаємодію, щоб отримати точні та реалістичні результати.

Для створення 3D-моделей поведінки частинок у Blender важливо враховувати фактор форми цих частинок. Форма частинок може впливати на їхню поведінку у симуляціях та візуальне відтворення. Наприклад, для частинок з різними формами можуть використовуватися різні алгоритми руху або взаємодії з іншими об'єктами.

Тобто, при створенні 3D-моделей частинок у Blender, важливо враховувати геометрію кожної частинки: її розмір, форму та орієнтацію. Наприклад, сферичні частинки можуть рухатися інакше, ніж частинки з комплексною формою, такою як куби або полігональні меші.

Врахування фактора форми допоможе точніше відтворити поведінку частинок у ваших симуляціях та забезпечить більш реалістичні результати.

Фактор форми частинок відноситься до геометричних характеристик самого об'єкта. В контексті композитних матеріалів, які складаються з частинок різного розміру, фактор форми вказує на геометричні особливості кожної частинки, такі як її розмір, форма та структура. Кожна з цих форм впливає на властивості матеріалу та його поведінку в різних умовах.

Фактор форми частинок важливий для розуміння, як вони взаємодіють одна з одною та з оточуючим середовищем. Він також враховується при моделюванні та аналізі матеріалів, що складаються з таких частинок, а також може бути використаний для прогнозування їхнього впливу на властивості та поведінку кінцевого матеріалу.

Це пояснюється тим, що фактор круглості визначається як відношення периметра кола, який має площу, що дорівнює площі проекції частинки, до периметра її контуру. Цей фактор пов'язаний з відомим раніше фактором Салтикова через квадратний корінь з останнього, але метод розрахунку фактора Салтикова є значно складнішим. Дослідники Шелег та Капцевич (1992, 2002) встановили зв'язок між фактором Салтикова та густиною матеріалу. За даними методиками, фактор форми визначається, як співвідношення проекцій ширини та довжини гранули чи частинки матеріалу і для дендритних і голко-подібних частинок він становить 0,2, а для часток ідеальної сферичної форми він варіюється від 0,9 до 1.

Під час вимірювання методом аналізу зображень основною інформацією є контури частинок та гранул матеріалів, що становить ключову відмінність цього методу від інших, таких як лазерна дифракція, метод загасання ультразвукових хвиль або спектроскопія крос-кореляції фотонів. Оскільки зображення містить інформацію про форму частинки (хоча й у двовимірному вигляді), воно дозволяє отримати більш повний опис її геометрії, а не лише розміру.

Існує безліч алгоритмів, які консолідують різні дані про контури частинок для отримання одного значення їх розміру за допомогою аналізу діаметра. Найбільш важливі з цих алгоритмів використовуються у програмному забезпеченні для обробки даних. Інші параметри використовуються для повного опису форми частинок при математичному розрахунку фактора форми.

З мікроскопії власних досліджень (рис. 2.1) визначимо основні параметри часток модифікованих матеріалів сталі та кераміки, за якими будемо формувати 3D-моделі.

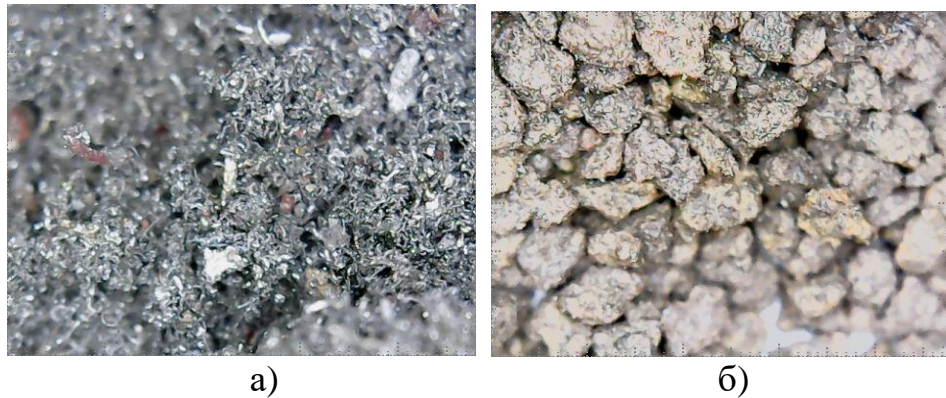


Рисунок 2.1 – Мікроскопія x400 зразків матеріалів: а) металу; б) кераміки

За серіями таких зображень, визначимо розміри часток, їх форми, числові характеристики фактору нерівності, дефекти та структуру, оптичні характеристики (рис. 2.2), які є важливими для точного моделювання матеріалів, а також для створення 3D-моделей з правильним розміщенням.

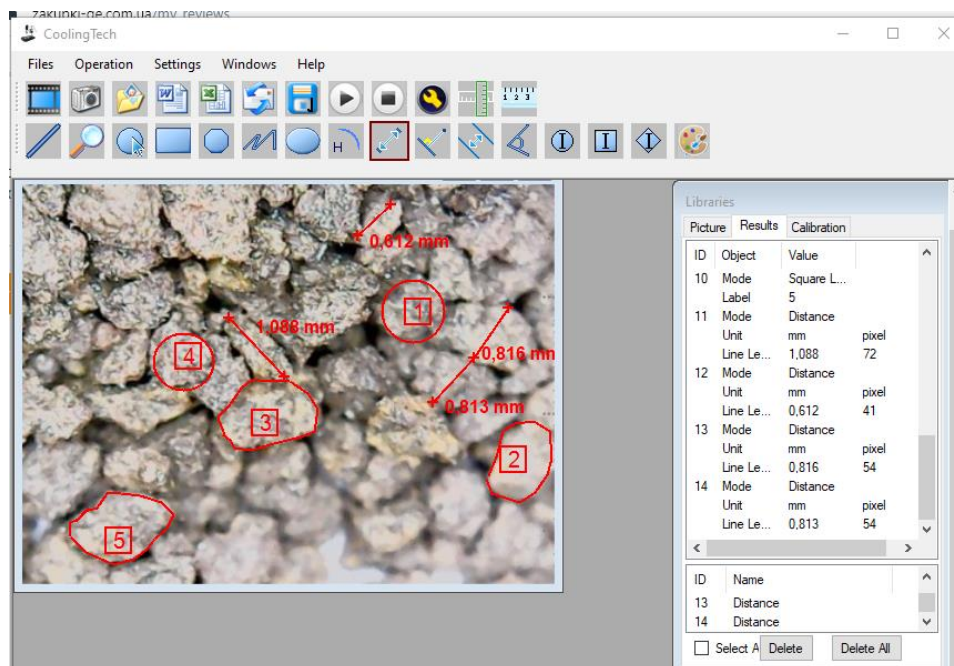


Рисунок 2.2 – Мікроскопія зображень

Для аналізу елементів матеріалів використано ImageJ – потужний і безкоштовний інструмент для обробки та аналізу мультимедійних даних [31].

Він має широкі можливості для обробки зображень, включаючи функції для вимірювання площі, периметру, довжини та інших характеристик об'єктів на зображенні. Для аналізу круглості таких об'єктів на зображенні, як частинки металу, використано наступну послідовність у програмі ImageJ: завантажено зображення, яке потрібно проаналізувати, далі використано інструменти сегментації, такі як порогування (рис. 2.3), щоб виділити об'єкти, які потрібно виміряти, а далі вимірювали площу та периметр кожного виділеного об'єкта за допомогою вбудованих функцій ImageJ.

Порогування – це процес виділення об'єктів на зображенні шляхом розділення пікселів на фонові та об'єктні на основі їхньої інтенсивності.

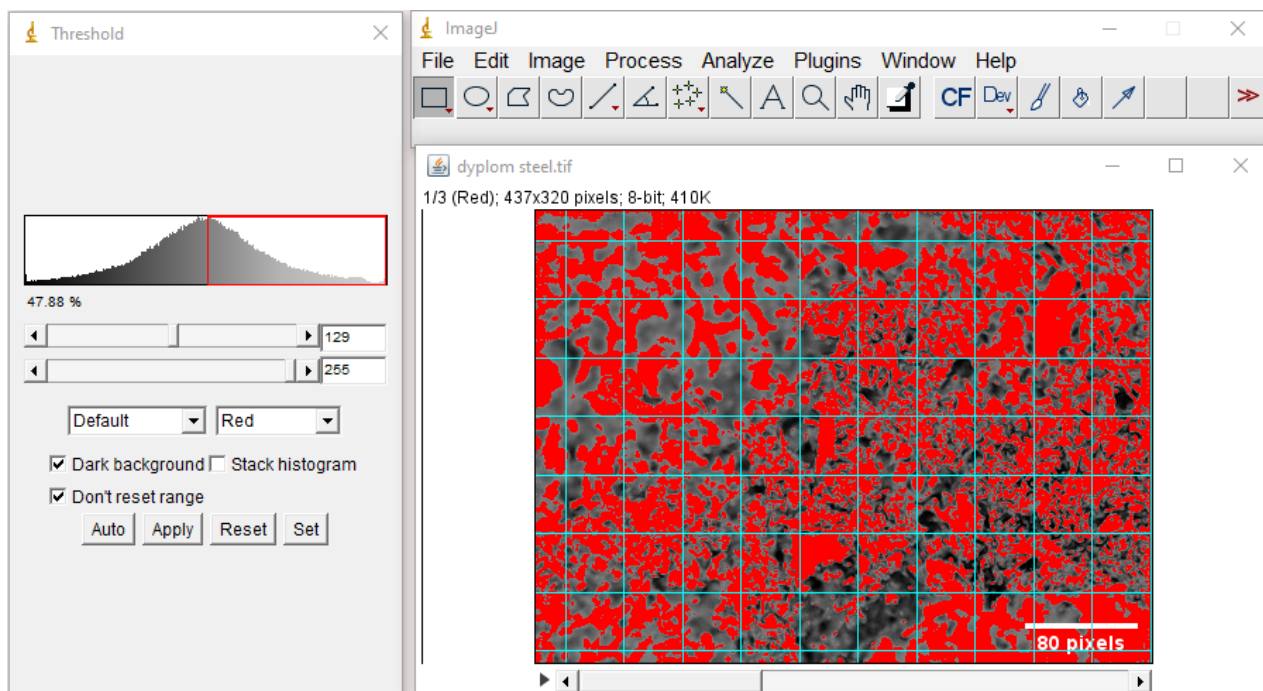


Рисунок 2.3 – Порогування мікроскопії засобами ImageJ

В процесі обробки можна виділити окремі об'єкти на зображенні за допомогою інструментів ручного або автоматичного вибору. Було вибрано плагін Volume Viewer (рис. 2.4) для площинного виділення об'єктів.

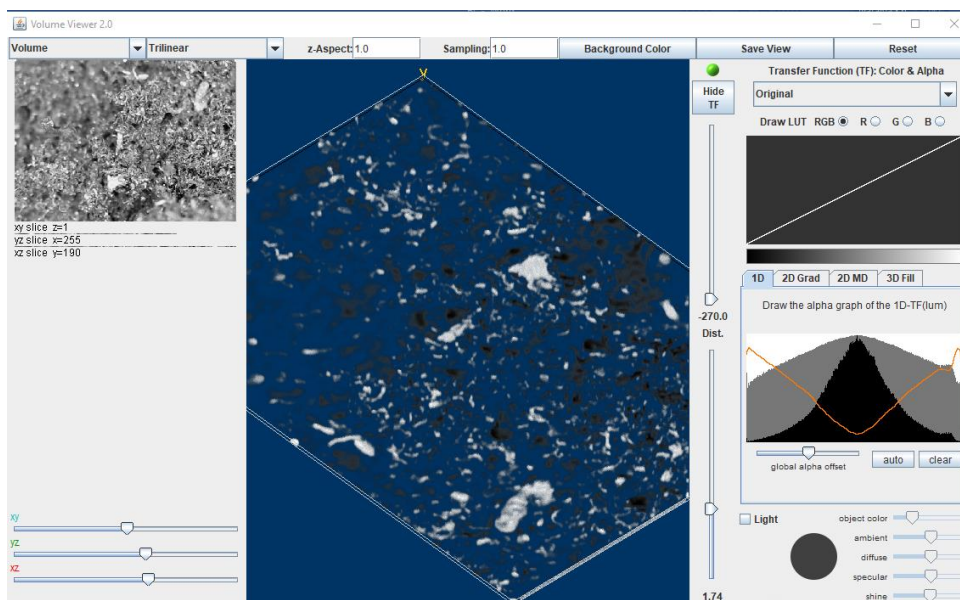


Рисунок 2.4 – Встановлення порогів образів об'єктів мікроскопії

Зазначений плагін забезпечує такий метод сегментації, який дозволяє автоматично виділити окремі об'єкти на зображенні залежно від їхньої форми, розміру або інтенсивності. Для подальших розрахунків факторів округлостей модифікували зображення для того, щоб візуалізувати та аналізувати тривимірні дані. Регулювання параметрів освітлення при відображенні тривимірних об'єктів подано на рисунку 2.5.

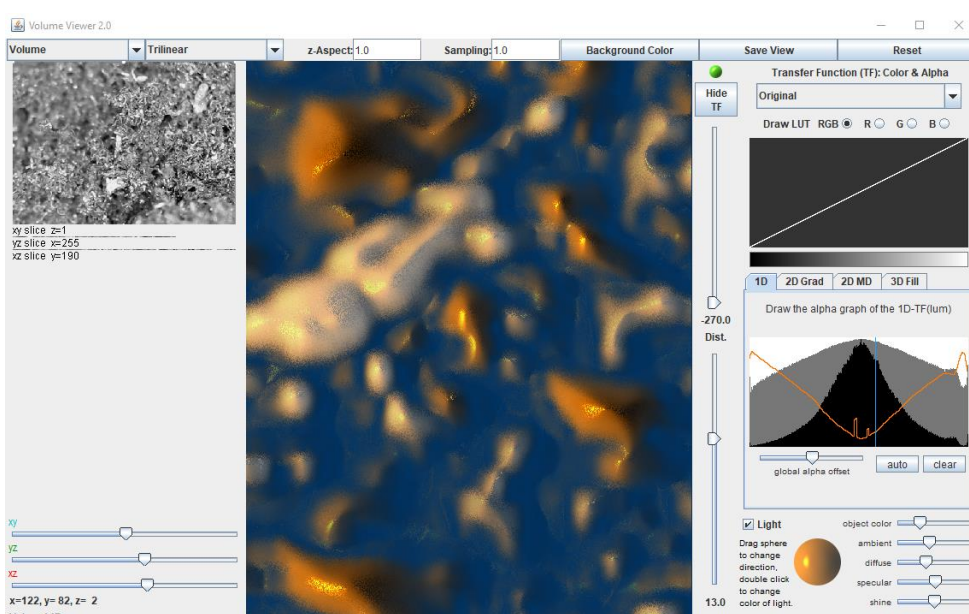


Рисунок 2.5 – Виділення форм тривимірних об'єктів

Інструменти освітлення в цьому плагіні відповідають за регулювання інтенсивності, напрямку та кольору світла, щоб підкреслити деякі аспекти візуалізованого об'єкта та покращити його видимість у тривимірному просторі.

Аналогічні дії проводили з мікроскопією частинок кераміки. Визначали пороги образів часток, а таблицю значень для обрахування факторів округлостей брали з масиву результатів Results програми ImageJ (рис. 2.6) :

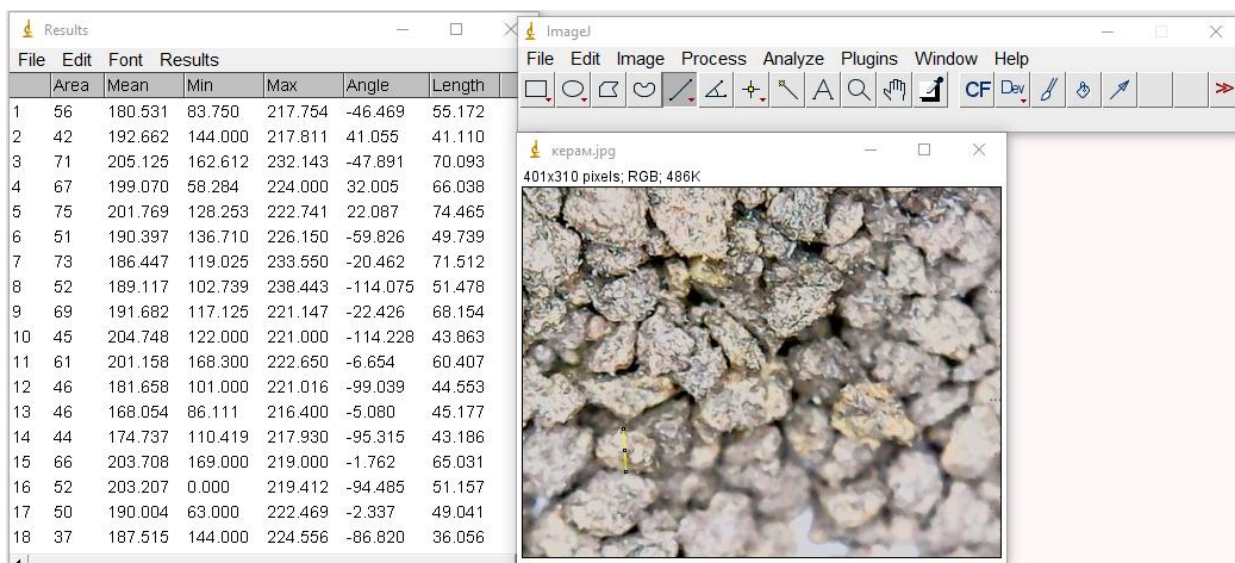


Рисунок 2.6 – Визначення порогових значень розмірів часток

Оскільки досліджувані матеріали дрібних розмірів, спочатку за допомогою програмного забезпечення ImageJ2x складемо таблиці розмірів та обрахуємо значення форм-факторів у визначених об'ємах і визначимо у відсотках кількість часток певних форм-факторів.

Обчислено фактор нерівності частинок – це відношення максимального і мінімального видимого розміру частинок для кожного об'єкта. Результати подані у таблиці 2.1.

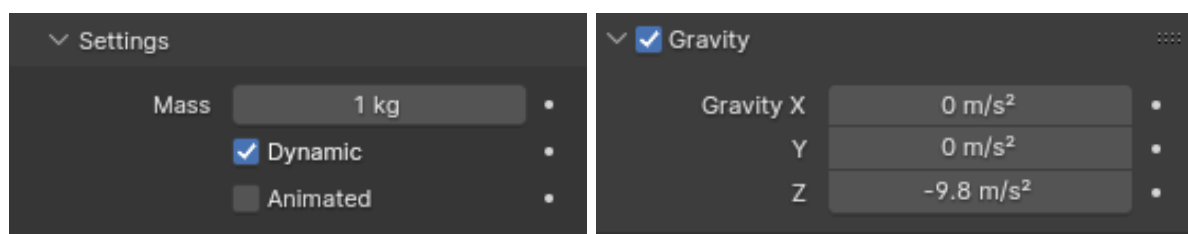
Таблиця 2.1 – Відсоток фактору нерівності за даними ImageJ

Фактори нерівності	Частинки кераміки, %	Частинки сталі, %
0,1-0,4	10	30
0,4-0,6	10	42
0,6-0,8	42	28
0,8-0,95	38	-

Кількість частинок у виділених об'ємах дають розуміння кількості аналогічно спроектованих частинок в Blender 3D для емуляції технологічного процесу.

Масу і величину гравітації використаємо з вихідних даних матеріалів. Інформація про масу матеріалу допоможе визначити вагу об'єктів у 3D-моделі для симуляції фізики, такої як рух і колізії. Величина гравітації впливає на поведінку об'єктів у 3D-сцені. Її використання для матеріалів сприяє створенню більш реалістичні сцени, де об'єкти впливають на силу тяжіння.

Параметри маси і гравітації будемо зазначати в Blender через налаштування панелей фізичних об'єктів проекту (рис. 2.7).



а)

б)

Рисунок 2.7 – Вікна налаштувань у Blender для: а) маси; б) гравітації

Спосіб вказання маси об'єктів у Blender, використовуючи параметр «Mass», реалізовано у властивостях об'єкта. Це дозволяє задати реалістичну вагу для симуляції руху та взаємодії проектованої частинки з іншими об'єктами у сцені. Гравітація у Blender за замовчуванням встановлена на значення $9,81 \text{ м/с}^2$, що відповідає стандартній земній гравітації. Крім того, для більш точної симуляції взаємодії об'єктів є панелі налаштувань додаткових параметрів, таких як сила тертя, пружність та демпфування. Це допомагає досягти більш реалістичних результатів і забезпечує коректну поведінку об'єктів під час симуляції.

У нашому випадку експеримент буде проводитись саме в таких умовах, але, якщо потрібно виконати симуляцію в умовах невагомості тощо, то можна змінити це значення в налаштуваннях сцени або використовувати спеціальні ефекти, які дозволяють модифікувати гравітацію для конкретних об'єктів, або областей сцени.

2.2 Використання експериментально отриманих даних для побудови математичної моделі

Факторами експериментів для побудови математичної моделі слугують наступні параметри: відсоток частинок кераміки з факторами нерівності 0,6-0,9; відсоток частинок сталі факторами нерівності 0,2-0,7; пористість сформованих зразків.

Побудуємо модель, де кожен фактор буде варіюватися мінімум на трьох рівнях – найнижчому, найвищому та в центрі експерименту (табл. 2.1). Дані результатів проведення експериментів вибирали з аналітичного огляду публікацій та наукових досліджень авторів, зазначених у розділі 1.1 даної кваліфікаційної роботи. Умови проведення експериментів подані у таблиці 2.2:

Таблиця 2.2 – Експериментальні значення технологічного процесу формування матеріалів

	Частка матеріалів з нерівністю 0,2-0,7, г.	Частка матеріалів з нерівністю 0,6-0,9, г.	Пористість зразків, %
Базовий рівень (X_{i0})	40	90	54
Інтервал (ΔX_i)	20	50	67
Верхня границя ($x_i = +1$)	60	150	35
Нижня границя ($x_i = -1$)	20	50	58

За даними умовами, усі фактори є кількісні. Виконавши перетворення між натуральними і закодованими значеннями факторів згідно роботи [32], розрахувавши усі коефіцієнти, отримуємо математичну модель у вигляді однофакторного ортогоналізованого рівняння регресії другого порядку:

$$Y = 67,5 + 8,4x_1 + 6,1x_2 + 4,38,4x_3 - 1,28x_1^2 - 2,3x_2^2 - 0,51,28x_3^2 + 1,2x_1x_2 - 0,9x_1x_3 - 1,75x_2x_3$$

Отримавши математичну модель у вигляді даного рівняння регресії другого порядку, що описує поверхню (рис. 2.8), спостерігаємо, що фіксуючи один

показник, може виникати легка нелінійність. Це означає, що вплив цього конкретного фактора на результат може змінюватися неоднаково при різних значеннях інших факторів. Така нелінійність важлива для точності моделі, оскільки дозволяє врахувати складні взаємодії між факторами та їх вплив на результат.

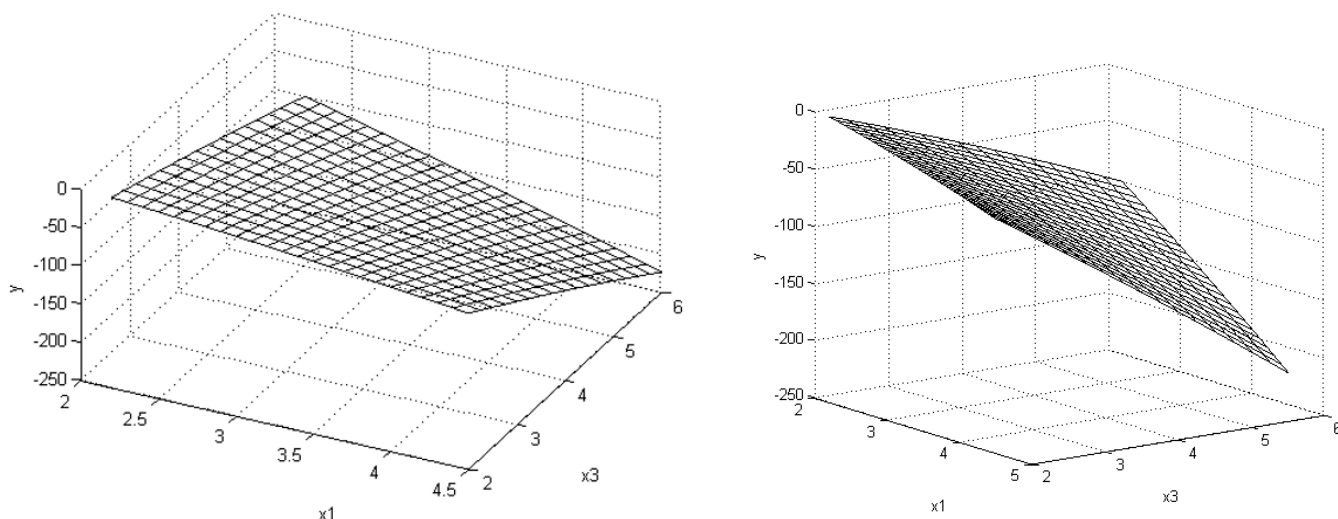


Рисунок 2.8 – Поверхні відгуку математичної моделі з фіксацією показників x_2

Побудовані поверхні відгуку для різних значень факторів, і було помічено, що при фіксованих значеннях лише одного фактора, поверхня проявляє кривизну. Це пояснюється тим, що цей фактор відіграє більш значущу роль у варіації порівняно з іншими факторами, і також через наявність квадратичних членів у рівнянні регресії.

Для оцінки точності отриманої математичної моделі було проведено порівняння розрахункових даних з експериментальними результатами. Зіставлення показало високу кореляцію між теоретичними значеннями, отриманими за допомогою моделі, та реальними експериментальними даними. Це свідчить про адекватність моделі та її здатність точно описувати досліджувану систему. Виявлені незначні розбіжності можуть бути пов'язані з експериментальними похибками або впливом не врахованих факторів.

Для 3D моделювання процесу, у кваліфікаційній роботі використаємо експериментальні значення запропонованої моделі. Це дозволить візуалізувати поверхню відгуку та краще зрозуміти взаємодію між факторами. Використання

експериментальних даних забезпечить більш точне і наочне представлення результатів, що підвищить надійність і достовірність моделювання.

2.3 Способи проектування текстур та рефлексії в Blender 3D

У Blender 3D існують кілька способів проектування текстур та рефлексій для створення реалістичних матеріалів у ваших 3D-сценах. Розглянемо усі ці способи з метою визначення ефективних для емуляції технологічного процесу.

Способом UV Mapping у Blender (рис. 2.9) реалізується процес розгортання тривимірної моделі на двовимірну площину для подальшого текстурування. Він дозволяє точно розміщувати текстури на 3D-об'єкті, забезпечуючи коректне відображення зображень, малюнків або текстур на поверхні моделі. Процес UV Mapping починається з ретопології, щоб переконатись, що всі поверхні мають чисту і зрозумілу геометрію. Далі в режимі редагування (Edit Mode) вибирається об'єкт, який потрібно розгорнути і одним з методів розгортання, наприклад, Unwrap, Blender створює UV карту для моделі, яку можна побачити у вікні UV Editor. Саме завдяки UV Editor процес стає більш інтуїтивним і контрольованим.

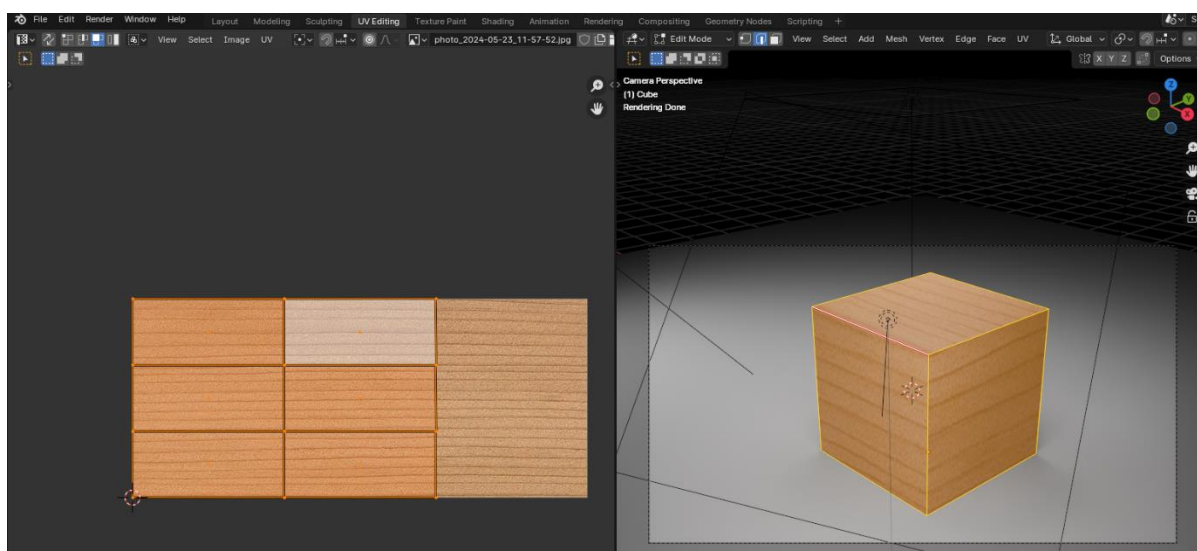


Рисунок 2.9 – Розгортка текстур у Blender методом UV Mapping

У Blender є ще один метод розгортання – Texture Paint (рис. 2.10). Цей метод дозволяє безпосередньо здійснювати малювання 3D моделі, що має особливості

створення і налаштування текстур. Texture Paint є зручним інструментом швидше для художників, які бажають мати більше контролю над деталями текстури. Принцип організації такого способу розгортання полягає у тому, що у панелі інструментів Tool Shelf вибирається потрібний пензель і налаштовуються його параметри, такі як розмір, сила, тип пензля тощо. Важливо, що можна створювати і зберігати власні пензлі для більшого контролю над процесом малювання.

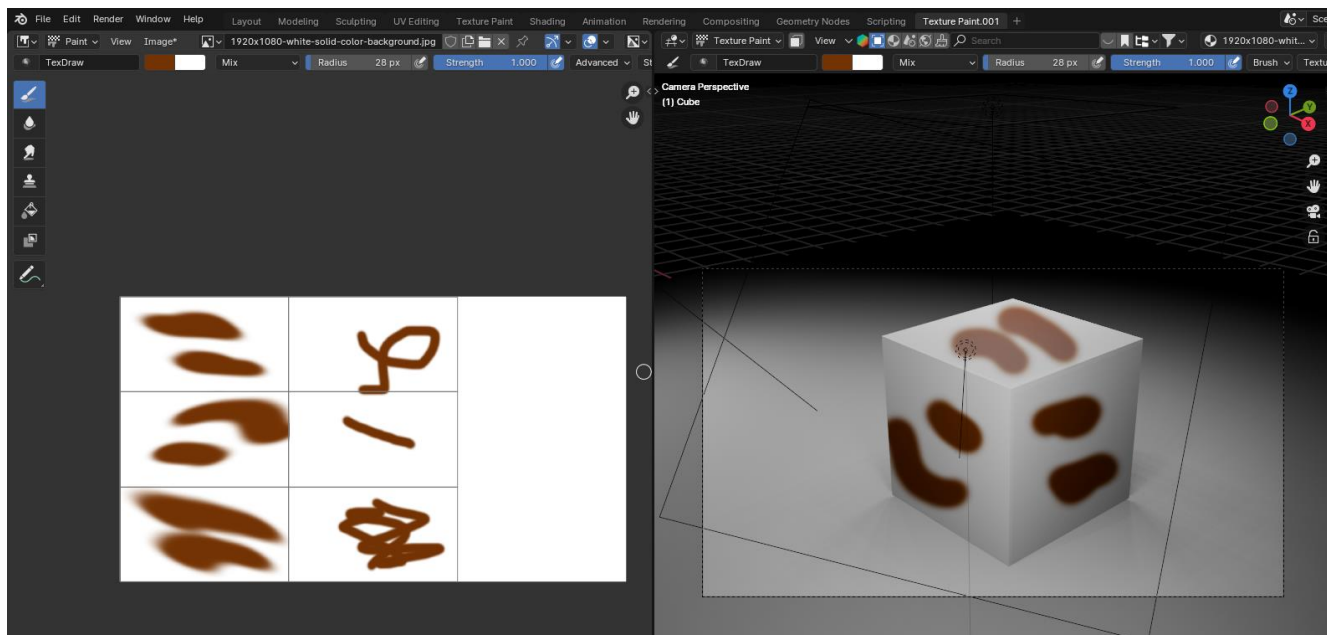


Рисунок 2.10 – Розгортка текстур у Blender методом Texture Paint

У двох розглянутих методів є свої переваги і недоліки. Головним недоліком UV Mapping є умова наявності потужного апаратного забезпечення для успішного рендерингу. Головним недоліком Texture Paint є досить примітивна імітація текстур, обмежені можливості для складних текстур. Образно кажучи, реалістична фото текстура проти пензля.

Тому, в кваліфікаційній роботі для кращої візуалізації, використано UV Mapping з використанням відеокарти у процесі розгортання. Підтримка GPU значно пришвидшує процеси рендерингу і роботи з текстурами, що дозволяє ефективно працювати з складною моделлю багатокomпонентної системи (мається на увазі велика кількість частинок в процесі формування та імітаційного

моделювання). Це зменшує навантаження на центральний процесор (CPU) і підвищує загальну продуктивність рефлексії.

Наступним важливим моментом в обробці текстур є спосіб рендерингу. На наш погляд, найсуттєвішими і найсучаснішими в Blender є два основні рушії рендерингу – Cycles та Eevee, кожен з яких має свої переваги та недоліки.

Eevee – це реалістичний рендерер в реальному часі, який використовує технологію рендерингу на основі екранного простору (screen-space). Він ідеально підходить для швидкого створення попередніх візуалізацій та інтерактивних проєктів. Окрім того, що цей рендерер швидкий, він дозволяє отримувати результати майже миттєво (рис. 2.11), тому є ідеальним для попереднього перегляду та інтерактивних візуалізацій. Його підтримка в реальному часі дозволяє миттєво бачити зміни в сцені. Також він менш вимогливий до апаратного забезпечення порівняно з Cycles, що робить його доступнішим для широкого кола користувачів.

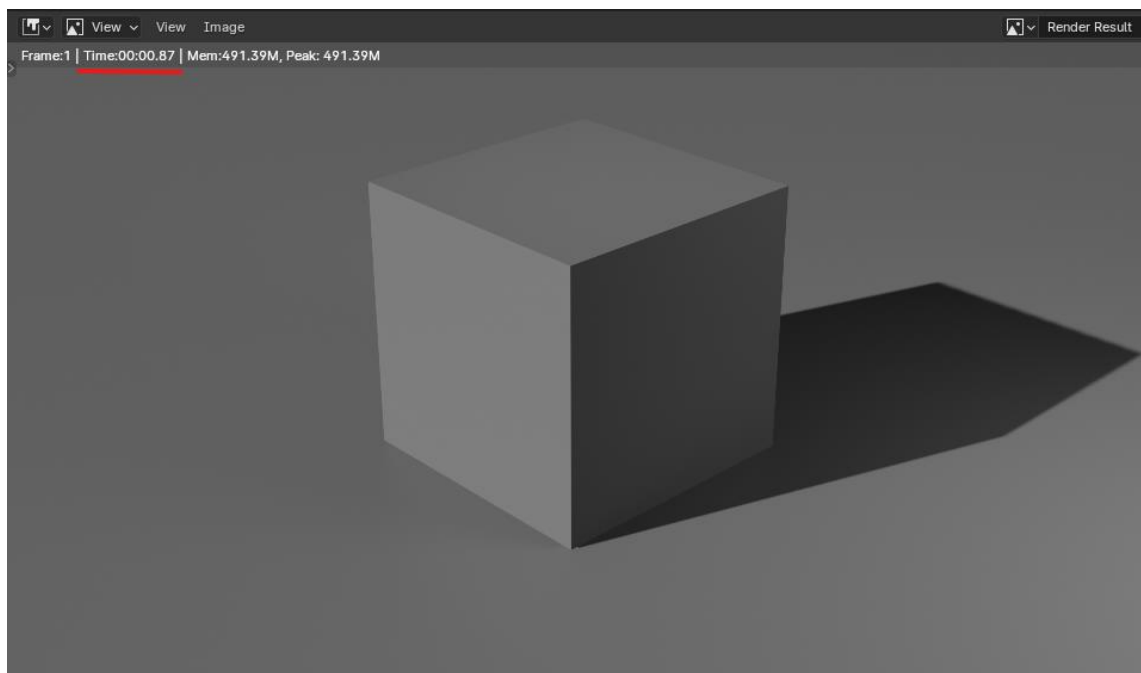


Рисунок 2.11 – Результат рендерингу в Eevee

Cycles, на противагу Eevee, є потужним рендерером, який використовує трасування променів для досягнення високої якості та реалістичності зображень. Він точно відтворює ефекти освітлення, відображення, прозорості та глобального

освітлення. І хоча Cycles значно повільніший порівняно з Eevee (рис. 2.12), особливо при рендерингу складних сцен з великою кількістю світлових джерел та ефектів і вимагає потужного апаратного забезпечення, особливо при використанні високоякісних текстур та складних матеріалів, але він забезпечує високий рівень реалістичності завдяки використанню фізично обґрунтованого рендерингу та точно відтворює ефекти освітлення, відображення, прозорості та глобального освітлення.

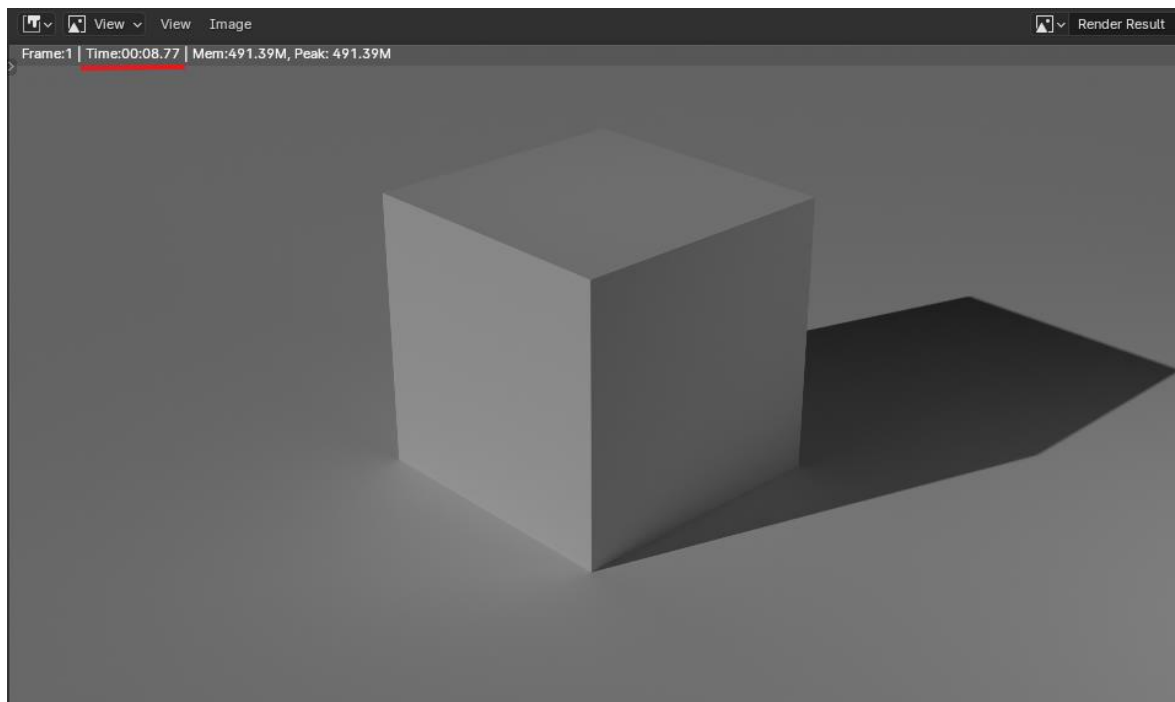


Рисунок 2.12 – Результат рендерингу в Cycles

На рисунках вище підкреслено час рендерингу. Зрозуміло, що він довший методом Cycles, аніж Eevee, проте, висока якість рендерингу методом Cycles очевидна.

Тому, в роботі використано рендерер Cycles, оскільки, з урахуванням зазначеного, він є кращим вибором для фінальних рендерів, де важлива висока реалістичність і фізична точність.

2.4 Програмні особливості відтворення імітації в Unity

Налаштування відтворення часової відео-симуляції в Unity дозволяє забезпечити оптимальні умови для відтворення імітації реального процесу, включаючи налаштування графіки, звуку, введення та інших параметрів. Загалом, усі етапи роботи в Unity проектувались за схемою (рис. 2.13):

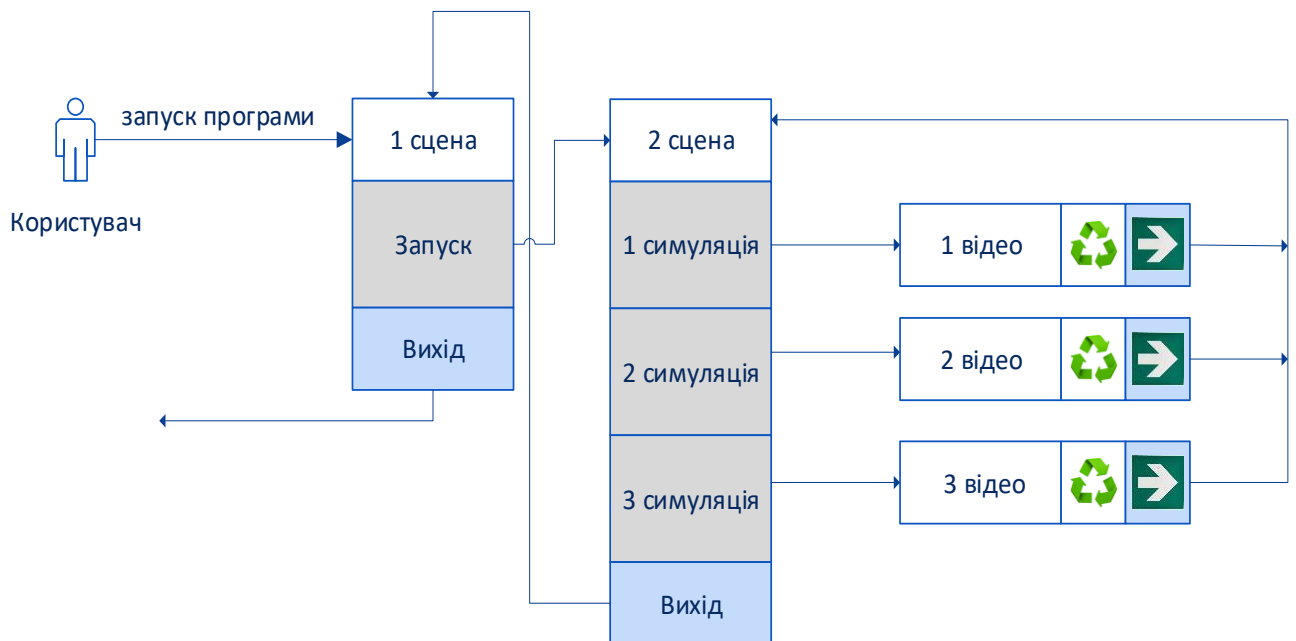


Рисунок 2.13 – Схема програми симуляції

В Unity було спроектовано першу сцену з меню «Запуск» і «Вихід». Програмно це реалізувалось так, як показано на лістингу 2.1.

Для переходу між сценами, такими як головне меню, запуск і вихід (згідно схеми, наведеної вище), створили дві сцени: MainMenu та GameScene.

Потім додали ці сцени до Build Settings через налаштування провідника програми (File – Build Settings) і додано обидві сцени до списку за допомогою кнопки Add Open Scenes.

Лістинг 2.1 – Створення меню рівнів

```

void StartGame()
{
    // Завантаження 2 сцени
    SceneManager.LoadScene("GameScene");
}

void QuitGame()
{
    // Вихід з гри
    Debug.Log("Game Quit");
    Application.Quit();
}
}

```

Кінець лістингу 2.1

Після створення інтерфейсу меню, розробили Canvas UI. У лістингу 2.2 наведено фрагмент цього скрипта.

Лістинг 2.2 – Реалізація переходу між сценами

```

void Start()
{
    playButton.onClick.AddListener(PlayGame);
    optionsButton.onClick.AddListener(OpenOptions);
    quitButton.onClick.AddListener(QuitGame);
}

void PlayGame()
{
    // Завантаження сцени гри
    SceneManager.LoadScene("GameScene");
}

```

Кінець лістингу 2.2

Симуляція технологічного процесу відбувається з відео представленням способів формування матеріалів з різними відсотками частинок кераміки і металу у складі. Тому, в розробці програми симуляції обов'язковим компонентом має бути відео плеєр. Для впровадження і налаштування відео плеєра в Unity скористались компонентом `VideoPlayer`, який забезпечив відтворення відеофайлів у додатку.

VideoPlayer в Unity – це важливий компонент, що дозволяє розробникам інтегрувати відео в свої ігри та додатки, роблячи їх більш динамічними та інтерактивними. Цей компонент підтримує різні формати відео, такі як MP4, AVI, та MOV, і забезпечує широкі можливості для налаштування відтворення.

Основна перевага VideoPlayer полягає у його гнучкості. Розробники можуть відтворювати відео як з локального сховища, так і з інтернету. Відео може відображатися на різних поверхнях – на об'єктах у тривимірній сцені, на UI-елементах або ж безпосередньо через камеру, що дозволяє створювати різні ефекти і сцени, від кінематографічних вставок до інструкцій і трейлерів.

Важливою особливістю VideoPlayer є можливість інтерактивного управління відтворенням. З допомогою скриптів, написаних на C#, можна створювати кнопки для запуску, паузи і зупинки відео, що робить взаємодію з медіаконтентом інтуїтивно зрозумілою для користувачів.

Користувацький скрипт, який створюється для управління VideoPlayer VideoController наведений у лістингу 2.3.

Лістинг 2.3 –Запуск та відтворення відео

```

public class VideoController : MonoBehaviour
{
    public VideoPlayer videoPlayer;
    public Button playButton;
    public Button pauseButton;
    public Button stopButton;

    void Start()
    {
        playButton.onClick.AddListener(PlayVideo);
        pauseButton.onClick.AddListener(PauseVideo);
        stopButton.onClick.AddListener(StopVideo);
    }

    void PlayVideo()
    {
        if (videoPlayer != null)
        {
            videoPlayer.Play();
        }
    }
}

```

Кінець лістингу 2.3

Також VideoPlayer підтримує події, які дозволяють розробникам реагувати на різні стани відтворення відео, наприклад, коли відео закінчується або коли виникає помилка. Крім того, VideoPlayer дозволяє регулювати швидкість відтворення, що додає ще більше варіантів для інтерактивного контенту. Це забезпечує високий рівень контролю над процесом відтворення і дозволяє створювати більш стійкі та надійні додатки.

Загалом, VideoPlayer в Unity є потужним інструментом для розробки мультимедійних додатків, що надає можливість інтегрувати відео в ігри і додатки на різних рівнях – від простих відеороликів до складних інтерактивних медіа. Завдяки своїй гнучкості і простоті використання, VideoPlayer дозволяє втілювати в життя найсміливіші ідеї, збагачуючи користувацький досвід і роблячи його більш захопливим.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ПРОГРАМИ ІМІТАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

3.1 Формування 3D елементів системи

На початку процесу формування створено базові примітиви, такі, як еліпси, сфери та циліндри, з яких формувалась основна структура моделі. Редагування вершин Vertices, ребер Edges і граней Faces проводили з використанням інструментів редагування, таких як Extrude, Bevel, Knife та Loop Cut. Далі було модифіковано ці базові форми (рис. 3.1), створюючи більш складні і детальні моделі, які відтворюють форму частинок: для цього використовували Subdivision Surface для згладжування моделей, Mirror для симетричного моделювання та Array для створення копій.

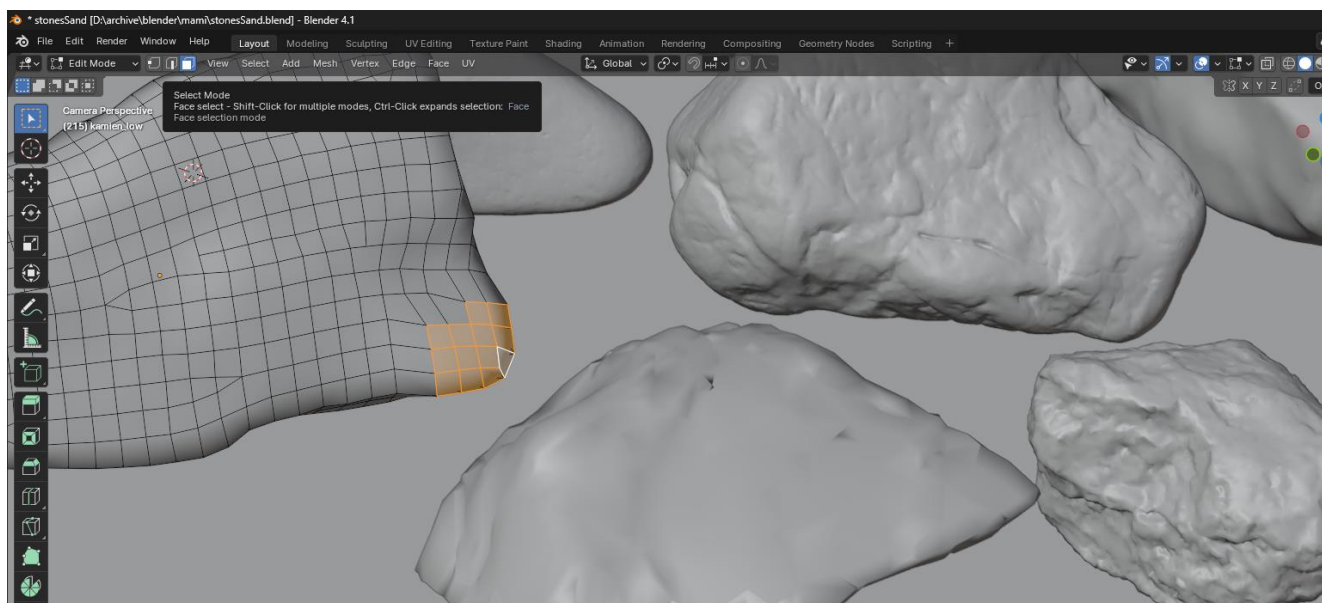


Рисунок 3.1 – Фрагмент редагування граней

Наступним кроком було виконано UV розгортку. Тобто, було здійснено перетворення тривимірної поверхні моделі на двовимірну площину, щоб можна було точно застосувати текстури. Матеріали визначали з урахуванням того, як поверхня моделі буде виглядати при рендерингу. Орієнтувались, в першу чергу, на такі властивості, як колір, відблиски, прозорість і текстури кераміки та металу (рис. 3.2).

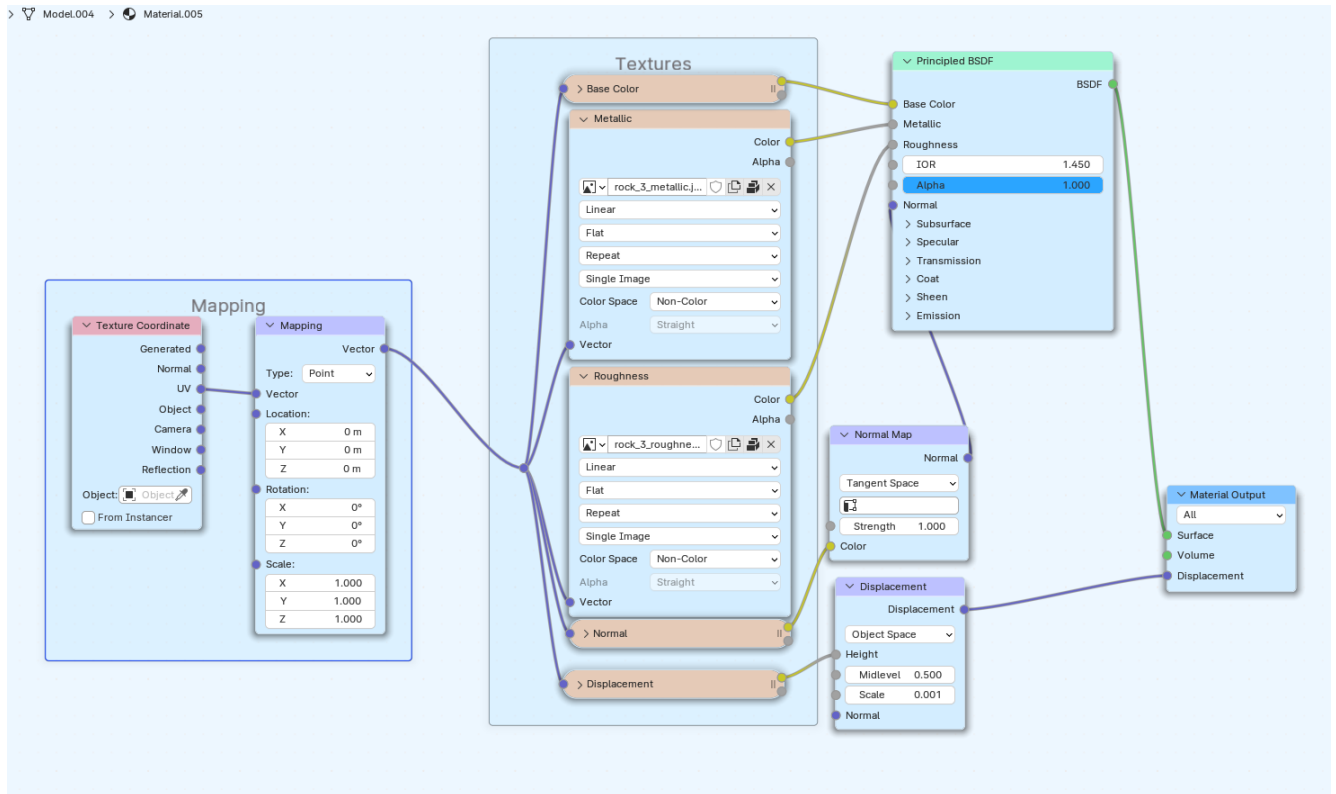


Рисунок 3.2 – Взаємозв'язки накладання текстур матеріалів

Для створення і налаштування матеріалів з використанням вузлів Nodes використано Shader Editor, а також налаштування освітлення. Освітлення грає ключову роль у відтворенні зовнішнього вигляду моделі процесу. Blender пропонує різні типи освітлення, такі як точкові джерела світла Point Lights, спрямовані джерела світла Sun Lights, і джерела світла в формі площини Area Lights.

У порівнянні цих трьох джерел, Area Lights випромінюють світло з поверхні певної області, що дозволяє створювати більш природне і м'яке освітлення. Це дає змогу уникнути різких тіней і створює більш реалістичний вигляд. Крім того, тіні від Area Lights зазвичай менш різкі і більш розмиті, оскільки світло розсіюється з великої площини, що робить їх ідеальними для імітації великих джерел світла. Тому, в кваліфікаційній роботі обрано джерело Area Lights (рис. 3.3).

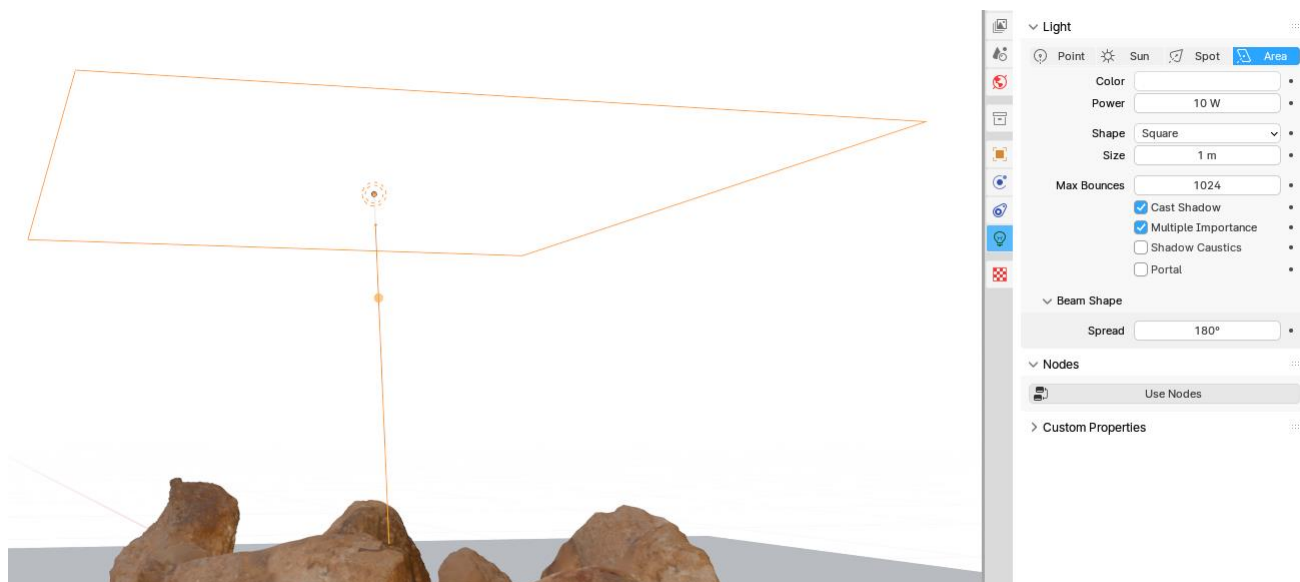


Рисунок 3.3 – Джерело світла Area Lights в процесі моделювання

Вибір рендерингу було обґрунтовано в другому розділі даної кваліфікаційної роботи. Cycles – це фізично коректний рендер-рушій, який забезпечує високоякісне зображення з глобальним освітленням, тінями і рефлексіями.

Створення ключових кадрів анімації Keyframes відбувалось шляхом встановлення ключових кадрів, які визначають стан моделі в певні моменти часу. Після кадрювання проміжні стани між ключовими кадрами інтерполювали автоматично.

Моделювання різноманітних форм у Blender передбачає використання різних інструментів і технік для створення складних і специфічних геометрій.

Для сферичних і округлих форм використано інструментарій Mesh та функції UV Sphere і Icosphere. Усі Mesh-об'єкти складаються з вершин, ребер і граней, які формують полігональну сітку, що визначає форму і структуру 3D моделі. Обидва способи, якими було описано сферичні частки, UV Sphere і Icosphere, стосуються різних типів сферичних примітивів. Головна відмінність – що в UV Sphere тип сферичного примітиву складається з меридіанів і паралелей, які розділяють поверхню сфери на сегменти і кільця, а в Icosphere – з рівносторонніх трикутників, утворених шляхом поділу поверхні ікосаедра.

Згідно збору реальних даних за результатами аналітичних досліджень, усі 3D моделі частинок, які використані в роботі, та їх характеристики подані в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Характеристики 3D об'єктів моделі

№	3D модель	Форма	Матеріал/текстура	Фактор нерівності
1		сферична	кераміка	0,9-1
2		сферична	кераміка	0,9-1
3		сферична	сталь	0,9-1
4		округла	кераміка	0,6-0,8
5		округла	кераміка	0,6-0,8
6		округла	сталь	0,6-0,8
7		пластинчаста	сталь	0,5-0,7
8		пластинчаста	сталь	0,5-0,7
9		губчаста	кераміка	0,4-0,6
10		дендритна	сталь	0,3-0,5

Для моделювання пластинчастих форм застосовували модифікатор Subdivision Surface для згладжування, а також інструмент Knife, щоб розрізати

площину частинки в 2-вимірному відображенні і додати деталі (порожнину, заглиблення тощо).

Для дендритних форм використано інструмент Extrude, щоб витягнути ребра і створити гіллясту структуру. Для створення більш складних дендритних форм застосували модифікатори Skin і Subdivision Surface, які формували реалістичні закінчення навколо вершини. Завдяки цим модифікаторам створювались ефекти дендритної структури частинок металу.

3.2 Проектування меню та взаємодія об'єктів

Розробка імітаційної програми симуляції розпочинали зі створення меню в середовищі Unity. Фрагменти програмування деталей переходу між сценами подано в лістингу 3.1.

Лістинг 3.1 – Перехід між сценами проекту

```

using UnityEngine;
using UnityEngine.SceneManagement;

public class SceneController : MonoBehaviour
{
    // Функція для завантаження сцени відтворення процесу
    public void LoadScene(string sceneName)
    {
        SceneManager.LoadScene(sceneName);
    }

    // Функція для виходу з додатку
    public void ExitGame()
    {
        // Закриває додаток
        Application.Quit();

        // В режимі редактора Unity
        #if UNITY_EDITOR
        UnityEditor.EditorApplication.isPlaying = false;
        #endif
    }
}

```

Кінець лістингу 3.1

Загальний вигляд меню програми спроектовано через Assets (рис. 3.4). Такий вибір інструментарію зумовлений кількома причинами, які стосуються організації, повторного використання, ефективності роботи та зручності керування ресурсами. По перше, використання Assets дозволяє зберігати всі ресурси, необхідні для створення меню (зображення, шрифти, скрипти, префаби тощо) в одному місці. Це робить проект більш організованим і полегшує пошук необхідних файлів і дає можливість вдосконалення програми симуляції технологічного процесу без додаткових механізмів організації ресурсів.

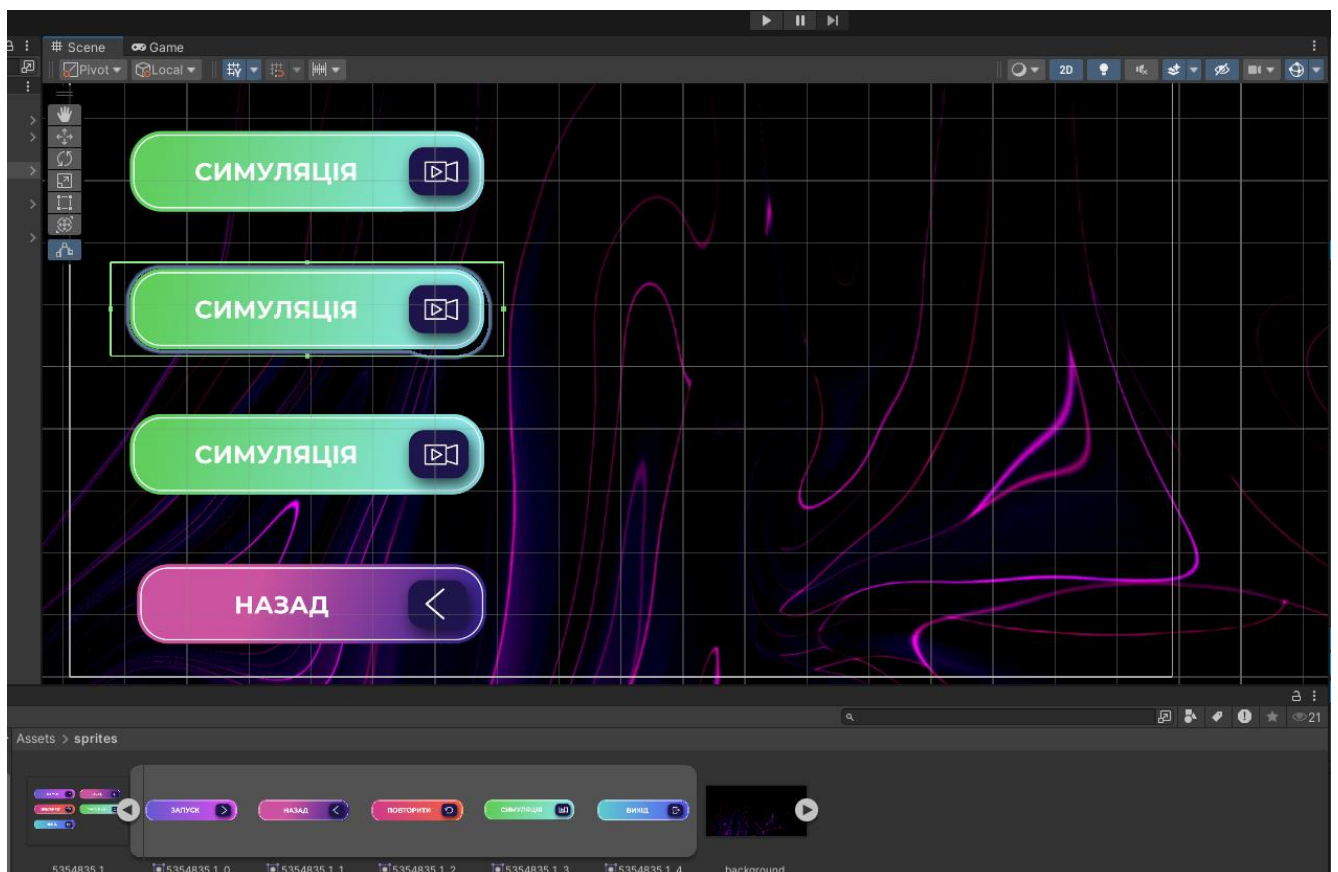


Рисунок 3.4 – Проектування меню

Першим кроком в налаштуванні меню було створення порожніх 3D боксів. Ці бокси слугують основою для кожної кнопки в меню. Вони створені, як прості 3D об'єкти типу Cube, які можна легко розміщувати та масштабувати у просторі сцени і їх використання дозволяє додати об'ємності кнопкам, що робить їх більш привабливими та реалістичними.

Кожен бокс оснащений компонентом `Vox Collider`, який визначає межі клікабельності кнопки. `Vox Collider` дозволяє точно налаштувати область взаємодії з кнопкою. Це важливий елемент, оскільки він забезпечує точність і ефективність взаємодії.

Наступним кроком стало додавання текстур до кожного боксу. Це зроблено шляхом створення матеріалів з відповідними текстурами кнопок і призначення їх до боксу. Для забезпечення функціональності меню, для кожної кнопки додано унікальний скрипт (лістинг 3.2) для певної дії (на кнопку «Вихід» – закривання додатку, на кнопку «Запуск» – перехід в меню симуляції, на кнопку «Симуляція» – відтворення процесу тощо).

Лістинг 3.2 – Обробка натискання на кнопку

```
start.cs*  X
1  using System.Collections;
2  using System.Collections.Generic;
3  using UnityEngine;
4  using UnityEngine.SceneManagement;
5
6  public class NewBehaviourScript : MonoBehaviour
7  {
8      void OnMouseDown ()
9      {
10         SceneManager.LoadScene ("Simulation");
11     }
12 }
```

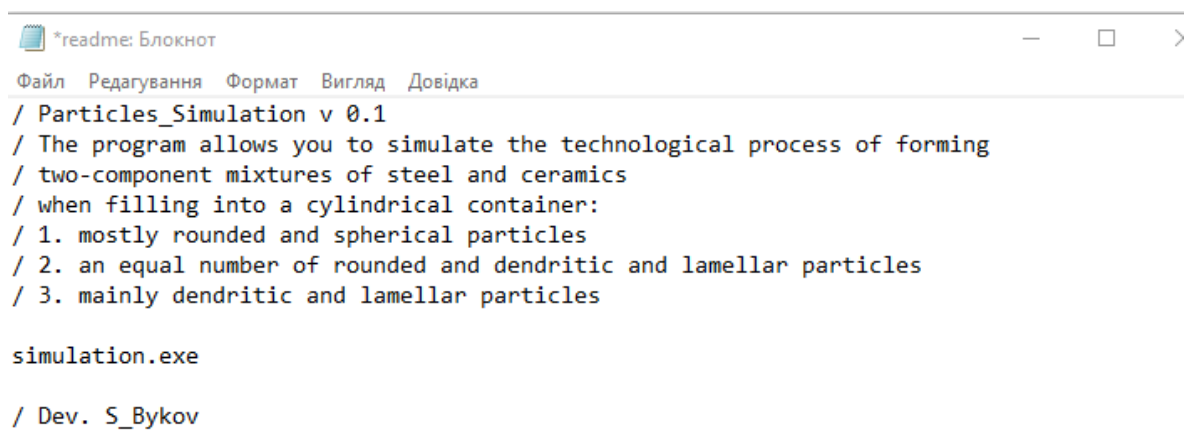
Кінець лістингу 3.2

Переваги такого способу проектування меню у тому, що це надає гнучкість у дизайні та дозволяє легко налаштовувати розміри і положення кнопок у просторі сцени.

Даний підхід робить меню більш інтерактивним та привабливим завдяки доданню об'ємності та текстур, а використання компонентів `Vox Collider` забезпечує точність взаємодії, що підвищує зручність користування.

3.3 Документування, збірка та тестування програми

Документування процесу відображено в інструкції користувача. Ця інструкція надає основну інформацію щодо використання програми симуляції технологічного процесу формування композиційних матеріалів. Інструкція має назву читати.txt та англomовний варіант readme.txt (рис. 3.5) і розміщена в папці основних файлів програми.



```

*readme: Блокнот
Файл  Редагування  Формат  Вигляд  Довідка
/ Particles_Simulation v 0.1
/ The program allows you to simulate the technological process of forming
/ two-component mixtures of steel and ceramics
/ when filling into a cylindrical container:
/ 1. mostly rounded and spherical particles
/ 2. an equal number of rounded and dendritic and lamellar particles
/ 3. mainly dendritic and lamellar particles

simulation.exe

/ Dev. S_Bykov
  
```

Рисунок 3.5 – Документування програми симуляції

Для компіляції проекту на платформу Windows за допомогою Unity Hub та встановлено модулі (рис. 3.6), які відповідають за компіляцію проекту на різні платформи та дозволяють розгортання проекту на різних пристроях.

Universal Windows Platform Build Support	Installed	2 GB
WebGL Build Support	Installed	2.54 GB
Windows Build Support (IL2CPP)	Installed	420.6 MB
Windows Dedicated Server Build Support	Installed	850.2 MB

Рисунок 3.6 – Встановлені модулі Unity для компіляції проекту

Universal Windows Platform Build Support дозволяє компілювати проект для платформи Windows, яка підтримується багатьма пристроями, такими як ПК,

планшети тощо. Через WebGL Build Support є можливість компілювати проект у форматі WebGL, що дозволяє запускати додаток в браузері без необхідності встановлення додаткового програмного забезпечення. Модуль IL2CPP використовується для компіляції проекту у код машини з розширеними можливостями оптимізації, що покращує продуктивність та безпеку програми. Windows Dedicated Server Build Support призначений в основному для розробки і запуску серверів на платформі Windows з можливістю створювати окремі серверні додатки, які можуть обробляти мережевий трафік та спілкуватися з клієнтами гри, але використовується і для інтерактивних додатків.

Наступний крок компіляції – це вибір версії в Player Settings з врахуванням подальших оновлень додатку. Вибір правильної версії є важливим, оскільки він визначає, на яких пристроях та операційних системах може працювати додаток. При цьому врахована потреба подальших оновлень, у разі, якщо виникне потреба додавання нових функцій, або виправлення помилок чи опцій в існуючій програмі.

Загалом, фрагменти екранних зображень скомпільованого і протестованого додатку подано на рисунку 3.7.

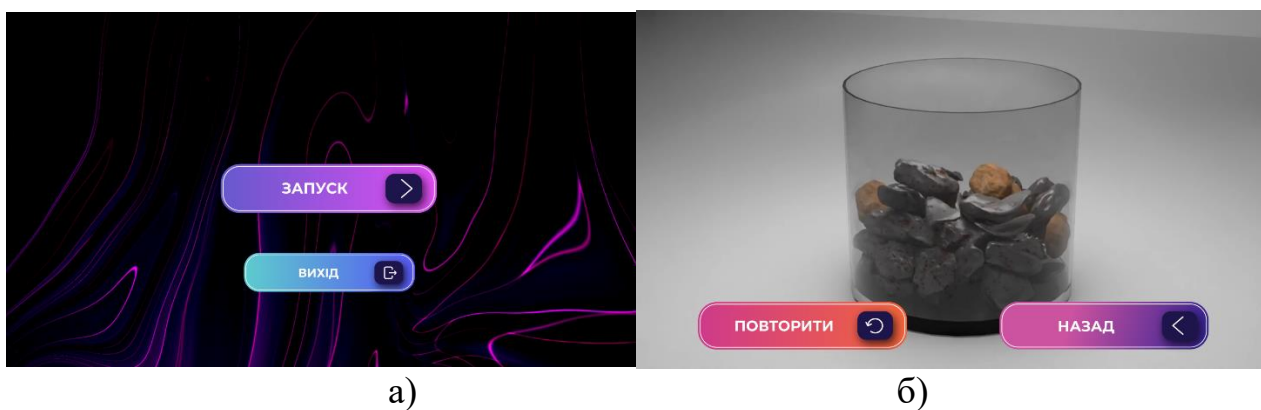


Рисунок 3.7 – Робота додатку в ОС Windows:

а) головне меню; б) етап симуляції

Успішна робота додатку в операційних системах родини Windows свідчить про те, що вона функціонує стабільно, швидко та ефективно, а всі функції програми працюють правильно і відповідають вимогам.

ВИСНОВКИ

Проведено всебічне дослідження та розробку програми імітації технологічного процесу формування композиційних матеріалів. Отримані результати підтверджують актуальність і важливість застосування комп'ютерного моделювання в цій сфері, а також демонструють ефективність використання сучасних інструментів і методів.

В результаті виконання кваліфікаційної роботи було виконано наступні завдання:

– досліджено теоретичні питання щодо способів комп'ютерного моделювання технологічних процесів і виявлено, що більшість розробників використовують у моделюванні ідеально-сферичні частки, але у реальних експериментах частіше зустрічаються більш складні та нерегулярні форми гранул, тому варто враховувати частки різних форм. У результаті аналізу рушіїв та пристроїв для мікроскопії обрано світлодіодну zoom-камеру Digital Microscope Magnifier 500X, для побудови моделі – Blender 3D, для формування додатку – Unity;

– сформовано математичний опис моделі динамічного процесу формування композиційного матеріалу та визначено, що модель представлена у вигляді однофакторного ортогоналізованого рівняння регресії другого порядку, має стохастичні коефіцієнти;

– сформовано алгоритм імітаційного моделювання і визначено, що збір реальних даних реалізується мікроскопією зразків матеріалів, розробка моделі і створення програми – програмним забезпеченням, документацію процесів формується текстовим методом;

– виконано мікроскопію зразків матеріалів, пороговання зображень засобами ImageJ та визначено, що показники фактору нерівності для дендритних і голко-подібних частинок він становить 0,2, а для часток ідеальної сферичної форми він варіюється від 0,9 до 1;

– сформовано 3D елементи, розроблено додаток для відтворення симуляцій технологічного процесу та успішно протестовано його роботу на операційних системах родини Windows.

Завдання, які ставились до виконання роботи, виконано. Отже, мета роботи досягнута.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Композиційні матеріали. *Енциклопедія сучасної України*. URL: <https://esu.com.ua/article-4385> (дата звернення: 17.02.2024).
2. Ткачук О. Л. Математичне моделювання технологічного процесу відварювання котоніновмісної тканини. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2021. №2 (295). С. 264-270. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2021-295-2-264-270> (дата звернення: 18.02.2024).
3. Rud V. D., Khrystynets N. A. Simulation Modeling of Forming Processes for Powder Mixtures. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2023. №61(9-10), pp. 514-521. URL: <https://doi.org/10.1007/s11106-023-00341-0> (дата звернення: 18.02.2024).
4. Theoretical and Experimental Studies of the Properties of Porous Permeable Materials Obtained from Industrial Waste / O. Povstyanou et al. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2022. Conference paper. P. 519–528. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0_51 (дата звернення: 18.02.2024).
5. Kashytskyi V. P., Sadova O. L., Klymovets O. B. Technology of forming modified epoxy composite coatings for the protection of oil and gas complex structures. *Journal of hydrocarbon power engineering*. 2023. 9(2), pp. 53-61. URL: [https://doi.org/10.31471/2311-1399-2022-2\(18\)-53-61](https://doi.org/10.31471/2311-1399-2022-2(18)-53-61) (дата звернення: 20.02.2024).
6. Dudarev I., Kirchuk R., Hunko Y. Modeling of mixing bulk materials. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2020. 12(4), pp. 54-64. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_6 (дата звернення: 20.02.2024).
7. Яганов П. О. Моделювання технічних систем і технологічних процесів. Вибрані розділи. Регресійний аналіз. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 54 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/5c09da47-af50-425a-8aea-d2bb9c20261e/content> (дата звернення: 01.03.2024).
8. Ігнат'єва В. Аналіз роботи профільних виробів, армованих волокнами композитів у конструкції. *Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій* : Пр. Міжнар. науково-техн. конф., присвяч. 70-річчю від дня народж. член-кор. нан україни, проф. яснія петра володимиров., м. Тернопіль, 10–11 листоп.

2022 р. Тернопіль, 2022. С. 60–62. URL: http://science.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2023/05/Zbirnik-tez-MicroCAD-2023-new_compressed-1.pdf (дата звернення: 01.03.2024).

9. Мікосянчик О. О. Аналіз моделей та методів оцінки міцнісних характеристик полімерних композиційних матеріалів. *Problems of friction and wear*. Т. 3, № 100. 2021. С. 15–27. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(100\).17891](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(100).17891) (дата звернення: 01.03.2024).

10. Liu Y. The genetic evolution behavior of carbides in powder metallurgy FGH96 Ni-based superalloys. *Journal of Materials Science*. №58. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s10853-023-09161-4> (дата звернення: 01.03.2024).

11. Zabolotnyi O., Pasternak V., Andrushchak I., Ilchuk N., Svirzhevskyi K. Numerical Simulation of the Microstructure of Structural-Inhomogeneous Materials. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. P. 562-571.

12. Lin J. Continuum percolation of the realistic nonuniform ITZs in 3D polyphase concrete systems involving the aggregate shape and size differentiation. *Science and Engineering of Composite Materials*. 2024. P. 161–182. URL: <https://doi.org/10.1515/secm-2022-0237> (дата звернення: 01.05.2024).

13. Wang K. Microstructural evolution and mechanical properties of Inconel 718 superalloy thin wall fabricated by pulsed plasma arc additive manufacturing. *Journal of Alloys and compounds*, 2020. P. 79-91 URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152936> (дата звернення: 23.04.2024).

14. MATLAB. MathWorks. Version R2024a. URL: <https://www.mathworks.com> (дата звернення: 27.02.2024).

15. Advanced Simulation Library. Avtech Scientific. Version 0.1.7. URL: <https://asl.org.il> (дата звернення: 27.02.2024).

16. John W. Eaton, Torsten Liljed. GNU Octave. GNU General Public License. Version 9.1.0. Free Software Foundation. URL: <https://www.octave.org> (дата звернення: 23.02.2024).

17. Долгов О. М. Композиційні матеріали. Дніпро : Дніпр. політехніка, 2022. 67 с. URL: <http://surl.li/swvwq> (дата звернення: 16.03.2024).

18. Алгоритм оцінювання якості 3D моделі для адитивного виробництва / В. Марчук та ін. *Матеріали та технології в інженерії (МТІ-2023)* : Зб. наук. доп. міжнар. конф., м. Луцьк, 16–18 трав. 2023 р. Луцьк, 2023. С. 178–180. URL: <http://surl.li/swwge> (дата звернення: 13.02.2024).

19. Rud V. D., Khrystynets N. A. Simulation Modeling of Forming Processes for Powder Mixtures. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2023. №61(9-10), pp. 514-521 URL: <https://doi.org/10.1007/s11106-023-00341-0> (дата звернення: 13.02.2024).

20. Markina L. Optimization of Ethanol Production Using State-Space Modeling and Optimal Control Technology. *The 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT-2023)*. Greece, Athens, October 13-15, 2023. URL: <http://surl.li/sxtli> (дата звернення: 14.05.2024).

21. Digital Microscope User Manual. *CoolingTech*. URL: <http://surl.li/swzne> (дата звернення: 10.03.2024)

22. Introducing modeling with Maya. Tutorial resources. Autodesk. URL: <http://surl.li/sxtjf> (дата звернення: 10.03.2024).

23. Autodesk 3ds Max 2024 Basics Guide. SDC Publications. URL: <http://surl.li/sxtli> (date of access: 10.03.2024).

24. Алхімія Cinema 4D. URL: <https://method.education/alhimiya-cinema-4d/> (дата звернення: 10.03.2024).

25. Unity. BiblProg Windows. Version 2023.2.19. URL: <https://biblprog.org.ua/ua/unity/> (дата звернення: 10.03.2024).

26. Blender. Version 4.1.1. URL: <https://www.blender.org/download/> (дата звернення: 6.02.2024).

27. Комп'ютерне моделювання систем та процесів / Р. Н. Кветний та ін. *ВНТУ*. URL: <http://surl.li/sxvjf> (дата звернення: 6.02.2024).

28. Дизайн експерименту при проведенні досліджень зі створення таблетованих лікарських засобів / Т. А. Грошовий та ін. *Фармацевтичний часопис*. 2020. № 3. С. 70–79. URL: <https://doi.org/10.11603/2312-0967.2020.3.11428> (дата звернення: 05.02.2024).

29. Моделювання обладнання і процесів перероблення полімерних матеріалів методом екструзії: монографія / О. Л. Сокольський та ін. Київ : КПІ ім.

Ігоря Сікорського, 2020. 252 с. URL: <http://surl.li/szkwc> (дата звернення: 05.02.2024).

30. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів: Електронне мережне навчальне видання. 2-ге вид. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 293 с. URL: <http://surl.li/szkwc> (дата звернення: 26.02.2024).

31. Tiago Ferreira, Wayne Rasband. Image J. Version v. 1.46. URL: <https://imagej.net>. (дата звернення: 25.04.2024).

32. Типові задачі математичного моделювання. Studfile. URL: <https://studfile.net/preview/9233446/> (дата звернення: 01.05.2024).