

Національний лісотехнічний університет України

(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут

комп'ютерних наук та інформаційних технологій

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра комп'ютерних наук

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Магістерська кваліфікаційна робота

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

на тему: «Програмно-алгоритмічне забезпечення моделювання поширення лісових пожеж засобами Python»

Виконав: студент 6 курсу групи КН-63м
спеціальності 122 “Комп'ютерні науки”

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Чудак Максим Петрович

(прізвище та ініціали)

Керівники Сало М.Ф., Яцишин С.І.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Чудак М.О.

(прізвище та ініціали)

Львів – 2025

Національний лісотехнічний університет України
(повне найменування вищого навчального закладу)


ННІ Комп'ютерних наук та інформаційних технологій

Кафедра Комп'ютерних наук

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 122 "Комп'ютерні науки"

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувачка кафедри КН

 Борецька І.Б.
"10" травня 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Чудак Максим Петрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Програмно-алгоритмічне забезпечення моделювання поширення лісових пожеж засобами Python

керівник роботи Сало М.Ф. ст.викл., Яцишин С.І. доцент, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 29 квітня 2025р. № С-288.

2. Термін подання студентом роботи 10.12.2025р.

3. Вихідні дані до роботи Аналіз існуючих математичних моделей вирішення поставленої задачі. Визначення переваг і недоліків різних фреймворків для реалізації поставленого завдання та вибору найкращих з них. Література за тематикою роботи.

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

Вступ. Розділ 1. Стан проблемної області.

Розділ 2. Інформаційне забезпечення.

Розділ 3. Математичне забезпечення.

Розділ 4. Програмне ззабезпечення.

Розділ 5. Розроблення стартап-проекту.

Висновки. Список використаних джерел. Додатки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Слайди для доповіді (підготовка матеріалу для доповіді загальним обсягом 10-12 слайдів)



6. Дата видачі завдання 1 травня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд та системний аналіз проблемної області. Огляд літературних джерел на досліджувану тему. Постановка задачі проєкту та формування функціональних вимог. Збір потрібних матеріалів.	02.05.2025 р. 23.05.2025 р.	Виконано
2.	Огляд сучасного стану проблемної області. Написання та оформлення першого розділу пояснювальної записки.	24.05.2025 р. 01.06.2025 р.	Виконано
3.	Написання та оформлення другого розділу. Аналіз інформаційного та математичного забезпечення.	02.06.2025 р. 19.07.2025 р.	Виконано
4.	Написання та оформлення третього розділу пояснювальної записки. Підготовка програмного забезпечення.	20.08.2025 р. 03.09.2025 р.	Виконано
5.	Програмна реалізація. Написання та оформлення четвертого розділу пояснювальної записки.	04.09.2025 р. 20.10.2025 р.	Виконано
6.	Розроблення стартап-проєкту.	21.10.2025р. 20-11.2025р.	Виконано
7.	Оформлення пояснювальної записки та здача на рецензування.	21.11.2025 р. 04.12.2025 р.	Виконано

Студент

Керівники роботи


(підпис)

(підпис)

(підпис)

Чудак М.П.
(прізвище та ініціали)

Сало М.Ф.
(прізвище та ініціали)

Яцишин С.І.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Дипломна робота містить 69 сторінок пояснювальної записки, 31 рисунок, 15 таблиць, 4 додатки.

У роботі представлено математичну модель поширення лісових пожеж, розроблену на основі диференціальних рівнянь у частинних похідних. Модель враховує основні фізичні фактори, що впливають на динаміку пожежі, такі як вологість середовища, кількість палива, вплив вітру та теплопередача. Алгоритм моделювання реалізовано методом скінченних різниць. Для реалізації моделі використано сучасні наукові бібліотеки Python. Отримані результати дозволяють аналізувати поширення лісових пожеж залежно від заданих параметрів, зокрема розмірів сітки, коефіцієнта дифузії, швидкості вітру та рівня вологості. Інтерактивний інтерфейс забезпечує гнучкість налаштування моделі та відображення результатів у вигляді двовимірних зрізів і тривимірних графіків.

Ключові слова: *математичне моделювання, поширення лісових пожеж, метод скінченних різниць, бібліотеки Python, алгоритми.*

ABSTRACT

The thesis contains 69 pages of explanatory note, 31 figures, 15 tables, 4 appendix.

The paper presents a mathematical model of forest fire spread, developed using partial differential equations. The model considers key physical factors influencing fire dynamics, such as environmental moisture, fuel availability, wind impact, and heat transfer. The modeling algorithm is implemented using the finite difference method and modern Python scientific libraries. The obtained results enable the analysis of forest fire propagation depending on input parameters, including grid size, diffusion coefficient, wind velocity, and moisture level. The interactive interface provides flexibility in configuring the model and visualizing results as two-dimensional slices and three-dimensional plots.

Keywords: *mathematical modeling, forest fire propagation, finite difference method, Python libraries, algorithms.*

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

Розробити програмну систему для моделювання поширення лісових пожеж з урахуванням впливу таких факторів, як вологість, наявність палива, вітер та теплопередача.

Реалізувати математичну модель поширення пожежі, засновану на диференціальних рівняннях у частинних похідних, застосувати алгоритм моделювання методом скінченних різниць. Забезпечити можливість візуалізації результатів у 2D та 3D форматах. Надати інтерактивний інтерфейс для налаштування параметрів моделювання. Побудувати тривимірні графіки поширення вогню для кожного часового кроку. Відображати зрізи інтенсивності горіння на вибраних часових кроках.

Для програмної реалізації використати мову програмування: Python та такі бібліотеки:

- NumPy (обчислення та робота з багатовимірними масивами).
- Matplotlib (візуалізація даних).
- ipywidgets (створення інтерактивного інтерфейсу).

Оформити пояснювальну записку відповідно до стандартів.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМНОЇ ОБЛАСТІ.....	10
1.1 Визначення понять та термінів.....	10
1.2 Сучасний стан інформаційних технологій математичного моделювання лісових пожеж.	11
1.3 Сучасний стан інформаційних технологій моніторингу поширення лісових пожеж	13
1.4 Цілі моделювання лісових пожеж.....	15
Висновок до розділу	15
РОЗДІЛ 2. ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	16
2.1 Використання Google Colab.....	16
2.2 Інтерактивні бібліотеки Python для візуалізації	18
2.3 Використання бібліотек (NumPy, Matplotlib, SciPy).....	21
Висновок до розділу	22
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	23
3.1 Умова задачі класичної моделі лісових пожеж	26
3.2 Математична модель поширення лісових пожеж.....	27
3.3 Чисельний розв'язок	28
3.4 Оцінка обчислювальної складності алгоритму.....	29
Висновок до розділу	30
РОЗДІЛ 4. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	31
4.1 Підходи до реалізації.....	31
4.2 Структура проєкту	31
4.3 Створення інтерфейсу для моделювання	33
4.4 Реалізація моделювання	36
4.5 Візуалізація результатів моделювання	37
4.6 Результати моделювання.....	40
Висновок до розділу	47
Розділ 5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ	48
5.1 Опис ідеї проєкту	48
5.2 Аналіз технологічних можливостей реалізації ідей проєкту	50
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту.....	51
5.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту	56
Висновок до розділу	59
ВИСНОВКИ.....	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	61
Додаток А.....	63
Додаток Б.....	65
Додаток В	67
Додаток Г.....	68

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЛП – лісова пожежа

ПК – персональний комп'ютер;

ПЗ – програмне забезпечення;

ІС – інформаційна система;

ОС – операційна система;

БД – база даних;

СУБД – система управління базами даних;

ПЗ – програмне забезпечення;

API – набір визначень взаємодії різнотипного ПЗ;

Developer Tools – інструменти для розробки;

IDE – комп'ютерна програмне середовище;

ML – машинне навчання;

UI – інтерфейс користувача;

ВСТУП

Лісові пожежі є однією з найсерйозніших екологічних проблем сучасності, спричиняючи значні втрати біорізноманіття, руйнування екосистем та впливаючи на зміну клімату. У зв'язку зі зростанням частоти та інтенсивності пожеж, особливо у зв'язку зі зміною кліматичних умов, важливість розробки ефективних методів прогнозування і моделювання їх поширення стає все більш актуальною. Традиційні методи оцінки пожежного ризику, засновані на статистичних даних, мають обмежені можливості при аналізі динамічних систем. Математичне моделювання, побудоване на основі фізичних законів, надає ефективний інструмент для оцінки динаміки поширення вогню з урахуванням впливу різних факторів, таких як вітер, вологість та кількість палива.

У даній роботі було розроблено математичну модель поширення лісових пожеж, яка базується на диференціальних рівняннях у частинних похідних. Для чисельного розв'язання моделі використано метод скінченних різниць, що дозволяє враховувати просторово-часову динаміку пожеж. Реалізація алгоритму виконана мовою програмування Python із використанням сучасних бібліотек, таких як NumPy, Matplotlib та Plotly, що забезпечує гнучкість у побудові візуалізацій і аналізі даних. Робота також включає створення інтерактивного інтерфейсу, що дозволяє користувачам змінювати параметри моделі та аналізувати результати моделювання в реальному часі.

Результати моделювання демонструють вплив ключових параметрів, таких як коефіцієнт дифузії, швидкість вітру та швидкість вигорання палива, на динаміку поширення пожежі. Важливим є те, що модель здатна передбачати сценарії поширення вогню за різних кліматичних і погодних умов. Це дозволяє використовувати отримані результати для розробки стратегій управління лісовими пожежами та зниження їх екологічного впливу.

Актуальність проблеми – лісові пожежі становлять загрозу екосистемам, інфраструктурі та життю людей, спричиняючи значні економічні втрати. У зв'язку зі зміною клімату зростає частота екстремальних погодних явищ, що

посилює ймовірність виникнення пожеж. Ефективне прогнозування динаміки пожеж є критично важливим для оперативного реагування та розробки запобіжних заходів. Математичні моделі надають потужний інструмент для аналізу процесів горіння, що робить їх затребуваними в сучасних умовах.

Об'єкт дослідження – програмно-алгоритмічне забезпечення процесу поширення вогню в рослинному середовищі.

Предмет дослідження – математичне моделювання та програмна реалізація динаміки поширення лісових пожеж за різних умов.

Мета роботи – розробити математичну модель поширення лісових пожеж, реалізувати її програмно та проаналізувати вплив ключових параметрів на динаміку пожеж.

Новизна роботи – використання сучасних підходів до моделювання лісових пожеж із врахуванням дифузії, адвекції та реакції. Інтеграція моделі з візуалізаційними інструментами, що дозволяють аналізувати результати у тривимірному просторі.

Практична значимість – результати роботи можуть бути використані для прогнозування поширення пожеж у різних регіонах, розробки стратегій запобігання та зниження шкоди. Інтерактивний інструмент моделювання може стати корисним для навчання та підготовки фахівців з управління природними катастрофами.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Визначення понять та термінів

Визначення основних понять та термінів у галузі математичного моделювання поширення лісових пожеж:

Математична модель – це формалізоване представлення реальних процесів у вигляді математичних рівнянь і залежностей, які описують поведінку системи (поширення пожежі) з урахуванням визначених параметрів і умов. Математична модель лісових пожеж охоплює терміни теплопередачі, реакції горіння, адвекції та дифузії.

Диференціальне рівняння у частинних похідних (PDE) – тип рівнянь, що описують зміну фізичних величин у просторі та часі, наприклад, швидкість поширення вогню. В контексті пожеж часто використовуються нелінійні PDE, які враховують взаємодію вогню, палива, вологості та інших факторів.

Дифузія – процес передачі тепла або речовини від областей з високою концентрацією (температурою) до областей з нижчою концентрацією. У контексті пожеж, дифузія моделює теплопередачу між сусідніми ділянками лісу.

Адвекція – процес перенесення тепла або речовини під впливом потоків, наприклад, вітру. Адвекція визначає напрямок і швидкість поширення вогню в залежності від вітрових умов.

Реакція горіння – хімічна та термічна взаємодія між паливом і киснем, яка призводить до виділення тепла. В моделях реакція враховує інтенсивність горіння, вплив вологості та кількість доступного палива.

Інтенсивність горіння – кількісна характеристика енергії, що виділяється під час горіння на одиницю площі за одиницю часу. Вона залежить від умов середовища, типу рослинності, вологості та температури.

Паливо – у математичних моделях пожеж паливом вважаються матеріали, що можуть горіти: рослинність, дерева, суха трава тощо. Кількість доступного палива впливає на швидкість і тривалість пожежі.

Вологість середовища – частка води у рослинності або ґрунті, яка зменшує ймовірність займання та швидкість поширення вогню. Вологість є ключовим параметром, який модифікує реакцію горіння.

Метод скінченних різниць – чисельний метод для розв'язання диференціальних рівнянь, який замінює похідні кінцевими різницями. Використовується для дискретизації рівнянь поширення пожеж у просторі та часі.

Геоінформаційні системи (GIS) – комп'ютерні системи для збору, аналізу та візуалізації просторових даних, таких як рельєф, рослинність, кліматичні умови. GIS дозволяє інтегрувати математичні моделі пожеж з реальними картами для точнішого прогнозування.

Коефіцієнт дифузії (D) – параметр, що визначає швидкість поширення тепла в середовищі. Чим вищий коефіцієнт, тим швидше тепло передається між сусідніми точками.

Швидкість вигорання (burn rate) – кількість палива, що згоряє за одиницю часу, визначає тривалість горіння на конкретній ділянці. Залежить від типу палива, температури та вологості.

Теплопередача – процес передачі енергії від гарячих ділянок до холодніших через конвекцію, провідність чи випромінювання. У моделюванні пожеж враховуються всі три механізми.

Ці поняття становлять основу для розробки математичних моделей і аналізу поведінки лісових пожеж у різних умовах.

1.2 Сучасний стан інформаційних технологій математичного моделювання лісових пожеж

Сучасні інформаційні технології для математичного моделювання лісових пожеж активно розвиваються завдяки потужностям сучасних обчислювальних систем, розвитку алгоритмів чисельного моделювання та інтеграції великих даних. Вони дозволяють не лише аналізувати реальні події, а й прогнозувати сценарії поширення вогню в умовах змінного середовища.

Моделювання з використанням диференціальних рівнянь у частинних похідних. Методи моделювання базуються на системах PDE (рівняннях теплопередачі, адвекції-дифузії та реакції). Чисельні методи, такі як методи скінченних різниць, об'ємів чи елементів, дозволяють дискретизувати та вирішувати ці рівняння. Завдяки цьому моделюються процеси поширення тепла, взаємодія між вогнем, вітром, рослинністю та вологою. Сучасні алгоритми реалізуються на високопродуктивних обчислювальних системах, таких як GPU або кластери, для швидкого розв'язання великих задач.

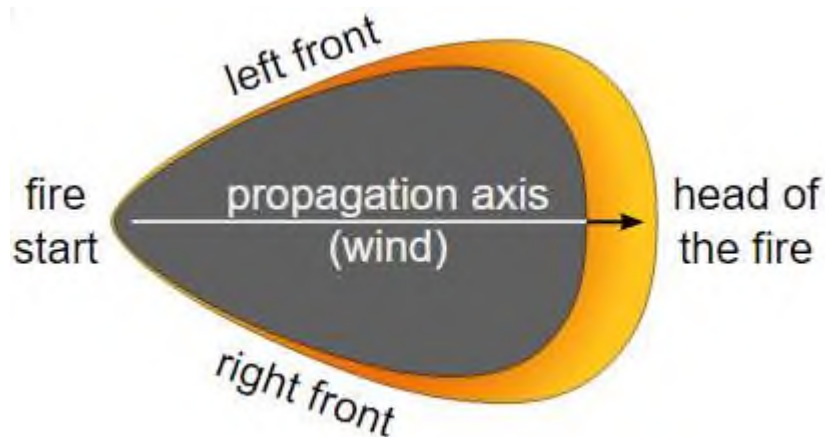


Рисунок 1.1 – Поширення пожежі відносно вітру

Інтеграція геоінформаційних систем (GIS). Математичні моделі лісових пожеж інтегруються з даними GIS для урахування географічних особливостей території. Інформація про рельєф, тип рослинності, кліматичні умови і розташування об'єктів передається моделям для підвищення точності розрахунків. GIS також використовується для візуалізації результатів моделювання у вигляді карт ризиків або прогнозів.

Алгоритми машинного навчання (ML) та штучного інтелекту (AI). Сучасні технології дозволяють доповнювати математичні моделі методами машинного навчання. Алгоритми AI аналізують великі обсяги історичних даних про пожежі, кліматичні зміни, тип рослинності та вітрові умови для створення гібридних моделей. Наприклад, нейронні мережі використовуються для оцінки ймовірності займання, класифікації ризиків і побудови швидких прогнозів поширення пожеж.

Розробка інструментів реального часу. Сучасні моделі реалізуються у вигляді програмних інструментів, які працюють у реальному часі. Наприклад, платформи OpenFOAM або FARSITE широко застосовуються для симуляції динаміки поширення пожеж. Дані з датчиків IoT, супутникових знімків і кліматичних моделей надходять у ці системи, забезпечуючи оновлення результатів моделювання кожні кілька хвилин.

Високопродуктивні обчислення (HPC). Математичне моделювання пожеж є ресурсоємним завданням, оскільки враховує велику кількість змінних і взаємодій. Технології HPC дозволяють виконувати моделювання на великих площах з високою роздільною здатністю. Обчислювальні системи з тисячами процесорів прискорюють симуляції, роблячи можливим їхнє використання для швидкого прийняття рішень.

Як відомо, «на теперішній час розроблено багато моделей лісових пожеж, зокрема математичних, фізичних, імітаційних, причому деякі з них є пакетами комп'ютерних програм. Огляд найпоширеніших моделей лісових пожеж проведено в літературі. Найбільш актуальними є фізичні моделі, в основі яких є системи диференціальних рівнянь в часткових похідних. Важливою передумовою практичного застосування таких моделей є їх перевірка на адекватність порівнянням результатів з реальною пожежею. Після позитивних результатів такої перевірки модель можна застосовувати для дослідження лісових пожеж інших насаджень»[1].

1.3 Сучасний стан інформаційних технологій моніторингу поширення лісових пожеж

Сучасний стан інформаційних технологій для моніторингу поширення лісових пожеж базується на інтеграції датчиків, супутникових систем, геоінформаційних технологій (GIS), штучного інтелекту (AI) та обчислювальних моделей. Ці технології дозволяють оперативно виявляти осередки займання, аналізувати їхній розвиток у реальному часі та прогнозувати можливі сценарії

поширення. Постійне вдосконалення обладнання та алгоритмів обробки даних забезпечує високу точність і швидкість аналізу.

Одним із ключових компонентів є супутникові системи спостереження, такі як NASA MODIS, VIIRS або програма Sentinel від Європейського космічного агентства (ESA). Ці системи надають зображення високої роздільної здатності, що дозволяє визначати температурні аномалії та виявляти пожежі навіть у віддалених регіонах. Додатково використовуються дрони та літаки з тепловізорами для збору локальних даних у важкодоступних місцях.

Геоінформаційні системи (GIS) забезпечують інтеграцію просторових даних, таких як рельєф, тип рослинності, кліматичні умови та межі населених пунктів. Це дозволяє створювати карти ризиків та моделювати поширення вогню з урахуванням місцевих умов. На основі таких даних приймаються рішення щодо евакуації, розташування протипожежних бар'єрів і розподілу ресурсів.

Штучний інтелект і машинне навчання активно впроваджуються для аналізу великих обсягів даних. Алгоритми можуть прогнозувати траєкторії поширення пожеж, оцінювати ризики та навіть ідентифікувати потенційні причини займання. Наприклад, AI використовує історичні дані про пожежі, кліматичні тренди та дані від сенсорів для побудови прогнозів у реальному часі.

Інтернет речей (IoT) також грає важливу роль у сучасному моніторингу. Датчики вологості, температури, вітру та диму встановлюються у лісах, що дозволяє виявляти перші ознаки займання. Ці пристрої передають дані через бездротові мережі до центральних систем, забезпечуючи швидке реагування на можливі загрози.

Очевидно, що «Однією з сучасних фізичних моделей є Wildland-Urban Fire Dynamics Simulator (WFDS). WFDS – розширений інтерфейс програмного середовища Fire Dynamic Simulator (FDS). Її застосовують для перевірки різноманітних гіпотез щодо поширення лісових та трав'яних пожеж. Але валідацій моделі проведено не надто багато. Відомими є дослідження трав'яних пожеж в Австралії та лісових пожеж в Канаді, на основі яких проведено

моделювання в WFDS з результатами, близькими до експериментальних. Але для соснових насаджень в Україні таких досліджень не проводилося..»[1].

Сучасні інформаційні технології дозволяють ефективно керувати процесами боротьби з лісовими пожежами. Подальший розвиток цих систем зосереджений на вдосконаленні обчислювальних моделей, збільшенні точності прогнозів і забезпеченні глобального покриття навіть у найвіддаленіших регіонах.

1.4 Цілі моделювання лісових пожеж

Як відомо «Моделювання лісової пожежі намагається відтворити поведінку власне самої пожежі, наприклад, як швидко вогонь поширюється, в якому напрямку, скільки тепла він генерує. Основний внесок в моделюванні поведінки є модель палива, або тип палива. Моделювання Поведінки може також включати пожежні переходи від поверхні («поверхневий вогонь») до крон дерев («Корона вогню»), а також крайню вогнестійкість, включаючи швидкі темпи поширення, вогонь вихором і високі добре розвинені конвекційні колони. Моделювання лісових пожеж пробує оцінити вогневі ефекти, такі як екологічна і гідрологічні ефекти вогню, витрата палива, а також кількості та швидкості диму» [2].

Крім цього, зазначається, що «в комп'ютерних науках моделювання лісових пожеж здійснюється чисельним моделюванням, для того, щоб зрозуміти та передбачити поведінку пожежі. Моделювання лісових пожеж може зрештою допомогти у пожежогасінні, а саме: підвищити безпеку, знизити ризики та мінімізувати збиток. Пожежне моделювання може також допомогти у захисті екосистеми, водозбору і якості повітря» [3].

Висновок до розділу

Сучасний стан інформаційних технологій у математичному моделюванні лісових пожеж характеризується високою точністю моделей, швидкістю розрахунків і можливістю інтеграції з реальними даними. Подальший розвиток цієї галузі спрямований на автоматизацію процесів моделювання, збільшення точності прогнозів та забезпечення доступу до технологій для моніторингу і управління пожежами у глобальному масштабі.

РОЗДІЛ 2. ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

2.1 Використання Google Colab

Google Colab (або Colaboratory) – це безкоштовне середовище для виконання Python-коду у веббраузері. Воно надає доступ до хмарних обчислень, GPU, TPU та інтеграції з Google Drive, що робить його ідеальним для наукових розрахунків, моделювання, аналізу даних та машинного навчання. Colab базується на Jupyter Notebook, тому підтримує структуру записників із кодом, текстом, зображеннями й інтерактивними графіками.



Рисунок 2.1 – Google Colab + Python

Використання для моделювання лісових пожеж. Google Colab надає всі необхідні інструменти для роботи над математичними моделями поширення лісових пожеж.

Використання бібліотек для чисельного моделювання Colab підтримує бібліотеки, такі як NumPy, SciPy, Matplotlib та Pandas, що необхідні для створення математичних моделей. Для задач моделювання лісових пожеж ці інструменти використовуються для розв'язання диференціальних рівнянь, обробки великих масивів даних та візуалізації результатів.

Обчислення на GPU. Лісові пожежі потребують високопродуктивних обчислень, особливо при моделюванні великих площ із високою роздільною здатністю. У Colab є можливість активувати апаратне прискорення (GPU або TPU), що значно пришвидшує розрахунки.

Інтеграція з хмарними сервісами. Дані, такі як супутникові знімки або GIS-шари, можна зберігати у Google Drive та зручно використовувати у Colab через інтеграцію. Це особливо корисно для завдань, пов'язаних із аналізом просторових даних та їхнім впливом на моделювання пожеж.

Візуалізація результатів. Colab дозволяє створювати інтерактивні графіки, тривимірні моделі та карти за допомогою бібліотек Matplotlib, Plotly чи PyVista. Це полегшує аналіз поширення вогню у просторі та часі.

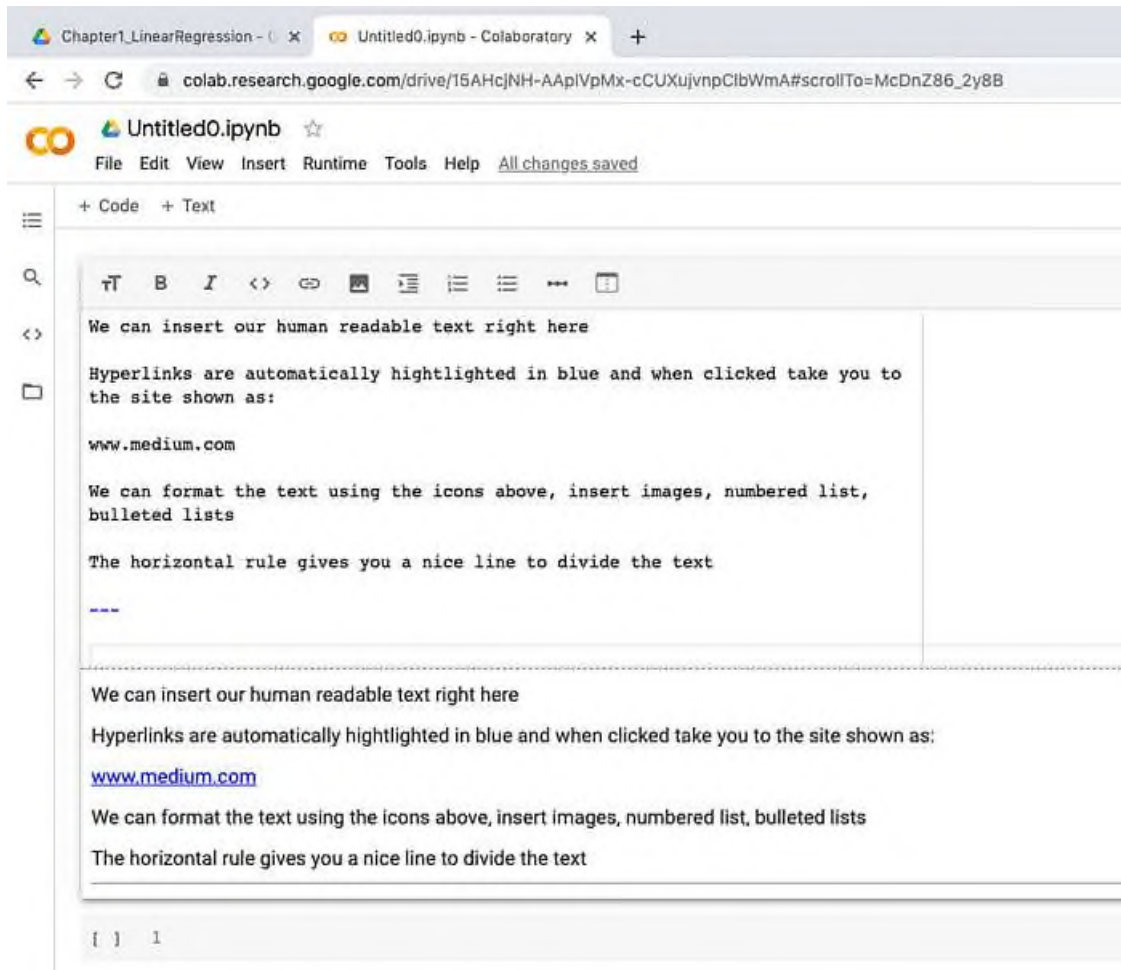


Рисунок 2.2 – Середовище онлайн розробки Colab

Спільна робота та зручність. Оскільки Colab працює у хмарі, кілька користувачів можуть одночасно працювати над одним проектом. Це важливо для міждисциплінарних команд, які займаються моделюванням пожеж.

За допомогою Python можна автоматизувати задачі, такі як моделювання різних сценаріїв пожеж, аналіз змін параметрів (вологість, швидкість вітру тощо) та створення звітів.

При моделюванні лісових пожеж у Colab можна ініціалізувати сітку для розрахунків із параметрами палива, вологості та вітру, застосувати чисельний метод, наприклад метод скінченних різниць, для розв'язання систем рівнянь поширення тепла та вогню, використовувати GPU для швидшого обчислення поширення вогню на великій площі, будувати тривимірні графіки інтенсивності горіння та карти вигорілих ділянок.

Переваги використання Colab

- Безкоштовність та доступність через веббраузер.
- Підтримка високопродуктивних обчислень.
- Інтеграція з популярними бібліотеками та інструментами.
- Можливість масштабування для складних задач.

Таким чином, Google Colab є універсальним інструментом для математичного моделювання, аналізу даних та побудови прогнозів поширення лісових пожеж.

2.2 Інтерактивні бібліотеки Python для візуалізації

Найпопулярніша інтерактивна бібліотека Python – **ipywidgets**, яка дозволяє створювати інтерактивні елементи для Jupyter Notebook, включаючи Google Colab. У середовищі Colab за допомогою `ipywidgets` можна додати слайдери, текстові поля, кнопки та інші інтерактивні елементи, що дозволяє змінювати параметри моделювання без необхідності переписувати код.

Щоб використовувати `ipywidgets` у Google Colab, його потрібно встановити код Рисунок.2.3.

```
!pip install ipywidgets
```

Рисунок 2.3 – Інсталювання бібліотеки

Ось приклад створення інтерактивного інтерфейсу для налаштування параметрів моделі та запуску моделювання.

```
# Інтерактивні віджети
interact(
    interactive_plot,
    D=FloatSlider(value=2.0, min=0.1, max=5.0, step=0.1, description='Diffusion Coeff. '),
    burn_rate=FloatSlider(value=0.1, min=0.01, max=0.5, step=0.01, description='Burn Rate'),
    v_x=FloatSlider(value=0.5, min=-1.0, max=1.0, step=0.1, description='Wind X'),
    time_step=IntSlider(value=0, min=0, max=time_steps - 1, step=1, description='Time Step')
)
```

Рисунок 2.4 – Інтерактивні віджети

Цей шматок коду (Рисунок 2.4.) створює інтерактивні віджети за допомогою функції `interact` із бібліотеки `ipywidgets`. Віджети дозволяють змінювати параметри моделі через графічний інтерфейс і автоматично відображати результати моделювання. Функція `interact` це основна функція, яка створює інтерактивний зв'язок між елементами інтерфейсу (віджетами) і функцією, яка обробляє введені дані (`interactive_plot`). Всі змінні, визначені як аргументи в `interact`, зв'язуються з відповідними віджетами.

Аргументи функції `interact`:

- `interactive_plot`: Функція, що викликається при зміні значення якогось віджета.
- `D=FloatSlider(...)`: Віджет для параметра коефіцієнта дифузії.
- `burn_rate=FloatSlider(...)`: Віджет для швидкості вигорання палива.
- `v_x=FloatSlider(...)`: Віджет для компоненти вітру по осі X.
- `time_step=IntSlider(...)`: Віджет для вибору часових кроків.

У даному проєкті ми використовуємо віджет `FloatSlider`, який створює слайдер для введення числових значень із плаваючою точкою. Функція має такі атрибути: `value`: Початкове значення, `min`: Мінімальне значення, `max`: Максимальне значення, `step`: Крок зміни значення, `description`: Текст, що пояснює параметр. Віджет `IntSlider` аналогічний `FloatSlider`, але використовується для цілих чисел.

Коли користувач змінює значення на слайдері, `interact` передає нові значення в функцію `interactive_plot`. Функція оновлює графік із новими параметрами.

Візуальний результат представлено на Рисунку 2.5.

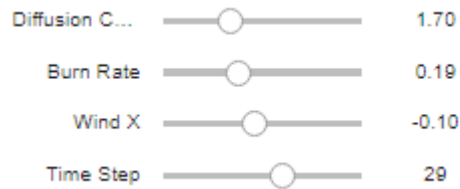


Рисунок 2.5 – Інтерактивні слайдери

Користувач бачить чотири слайдери: для налаштування коефіцієнта дифузії. для швидкості вигорання. для швидкості вітру по осі X. для вибору часових кроків.

Plotly – це популярна бібліотека для побудови інтерактивних графіків, яка використовується в різних галузях для візуалізації даних. Її функціональність охоплює як прості графіки, так і складні тривимірні моделі. Завдяки інтерактивності, Plotly ідеально підходить для створення інтерфейсів, які дозволяють досліджувати моделі в режимі реального часу, що є актуальним у задачах математичного моделювання, таких як поширення лісових пожеж.

Основні можливості Plotly:

- Інтерактивні графіки: масштабування, переміщення, вибір даних прямо на графіку.
- Тривимірна візуалізація: побудова поверхонь, точкових діаграм, ізоліній, що корисно для відображення просторово-часових процесів, наприклад, поширення пожежі.
- Інтеграція з Python: Просте використання через бібліотеку `plotly.graph_objects` або `plotly.express`.



Рисунок 2.6 – Приклад подання графіків з бібліотеки

Переваги використання Plotly. Інтерактивність - можливість змінювати вигляд графіків і взаємодіяти з ними в реальному часі. Гнучкість - підтримка широкого спектра візуалізацій, включно з картами, гістограмами, 3D-моделями. Простота інтеграції - може бути використана разом із Jupyter Notebook, Google Colab або як окремий веб-додаток.

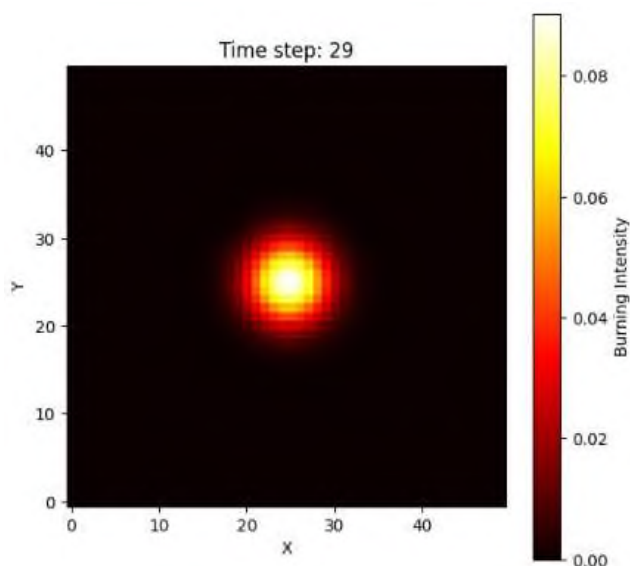


Рисунок 2.7 – Інтерактивний графік відповідно до параметрів

Графік (Рисунок 2.7.) змінюється в реальному часі залежно від обраних параметрів.

2.3 Використання бібліотек (NumPy, Matplotlib, SciPy)

Python є потужним інструментом для розв'язання задач математичного моделювання, зокрема моделювання поширення лісових пожеж. У поєднанні з науковими бібліотеками Python забезпечує ефективне обчислення, обробку даних та візуалізацію. У цьому підрозділі розглянемо ключові аспекти використання бібліотек NumPy, Matplotlib і SciPy.

NumPy використовується для створення багатовимірних масивів, які представляють фізичні поля (наприклад, інтенсивність горіння, кількість палива, вологість). Завдяки високопродуктивним математичним операціям над масивами, можна швидко виконувати диференціальні обчислення, такі як оператор Лапласа, який моделює дифузію. Переваги в тому, що обчислення виконуються набагато

швидше, ніж із використанням звичайних циклів Python. Крім цього - легкість інтеграції з іншими бібліотеками.

Matplotlib для візуалізації результатів. Matplotlib використовується для побудови двовимірних і тривимірних графіків, які відображають динаміку поширення пожежі в часі. Графіки дозволяють аналізувати зміну інтенсивності вогню, вплив параметрів (вітру, вологості) та вигорання палива. Переваги в тому, що широкий спектр візуалізацій: від простих графіків до 3D-поверхонь. Інтеграція з інтерактивними інструментами, такими як `ipywidgets`.

SciPy є бібліотекою для чисельного моделювання, яка доповнює NumPy функціями для інтегрування, оптимізації та обробки сигналів. У задачі моделювання пожеж SciPy використовується для згладжування даних (наприклад, оператор Гаусса для моделювання дифузії). Переваги - легкість реалізації складних математичних операцій, висока точність результатів.

Синергія бібліотек у моделюванні. NumPy забезпечує основу для ефективної роботи з великими масивами даних. Matplotlib дозволяє наочно відобразити результати, а SciPy доповнює функціональність для розв'язання складних математичних задач. Усі три бібліотеки інтегруються без зайвих складнощів, що робить Python універсальним інструментом для моделювання природних явищ, таких як лісові пожежі.

Висновок до розділу

Завдяки своїй інтерактивності та простоті використання бібліотеки для візуалізації, зокрема, Plotly є ідеальним інструментом для дослідження складних динамічних процесів, таких як поширення лісових пожеж. Використання Python і бібліотек NumPy, Matplotlib і SciPy значно спрощує реалізацію математичних моделей, забезпечуючи зручність роботи з даними, високопродуктивні обчислення та потужні засоби для візуалізації. Це дозволяє не лише створювати ефективні алгоритми, але й проводити глибокий аналіз їхніх результатів.

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Математичне моделювання поширення лісових пожеж є важливим інструментом для аналізу і прогнозування поведінки вогню в лісових екосистемах. Воно дозволяє дослідникам і практикам оцінювати динаміку вогню, включаючи його швидкість, напрямок поширення, вплив на навколишнє середовище і ефективність протипожежних заходів. Моделі можуть враховувати різноманітні фактори, такі як фізичні властивості середовища (вологість, кількість палива, топографія) та атмосферні умови (вітер, температура, опади).

Однією з ключових переваг моделювання є можливість врахування складних факторів, таких як неоднорідність ландшафту, нерівномірність розподілу палива та вологості, а також вплив погодних умов. Сучасні моделі можуть інтегруватися з географічними інформаційними системами (ГІС), дозволяючи створювати високоточні прогнози для реальних територій. Завдяки цьому з'являється можливість оцінювати ризики і приймати обґрунтовані рішення для зменшення шкоди від пожеж.

Існують дослідження в яких «розроблено математичну модель поширення пожежі на основі клітинних автоматів у двовимірному просторі для подальшого використання в комп'ютеризованому тренажерному комплексі підготовки пожежного-рятувальника. Розглянуто моделювання поширення пожежі всередині будівель у тривимірному просторі. Вказано на основні відмінності моделей клітинних автоматів, наведено приклади їх застосування на практиці. Розроблено математичну модель поширення пожежі на основі клітинних автоматів у тривимірному просторі для подальшого використання в комп'ютеризованому тренажерному комплексі підготовки пожежного-рятувальника»[3].

Крім цього «проведено математичне моделювання процесу теплопередачі в сосновій хвої в результаті теплообміну при контакті одного з кінців з високотемпературним об'єктом, таким як тліючий шматок дерева, іскра, недопалок. Отримано залежності температури від відстані та часу без та з конвективним теплообміном між бічною поверхнею голки та повітрям. У

результаті моделювання встановлено, що в сухій голці процес теплообміну протікає інтенсивніше, а частина голки фіксованої довжини швидше нагрівається до температури самозаймання сухої голки, що свідчить про її більшу пожежонебезпеку, ніж живої. Розроблено також математичну модель нагрівання хвої шляхом радіаційної теплопередачі від полум'я поверхневого кострища. Отримано температурну залежність від часу нагріву джерела теплового випромінювання у вигляді прямокутника. За допомогою залежності для хвої розраховано час нагріву до температури самозаймання»[4].

У [5] описано, що «всі математичні моделі лісових пожеж, які лежать в основі систем оцінки лісової пожежної небезпеки, згідно Вебера [6], можуть бути розділені на три групи: емпіричні (або статистичні), напівемпіричні (або лабораторні) і фізичні (або аналітичні) (рис. 2). У реальних завданнях прості емпіричні моделі трансформуються в складніші – фізичні моделі.»

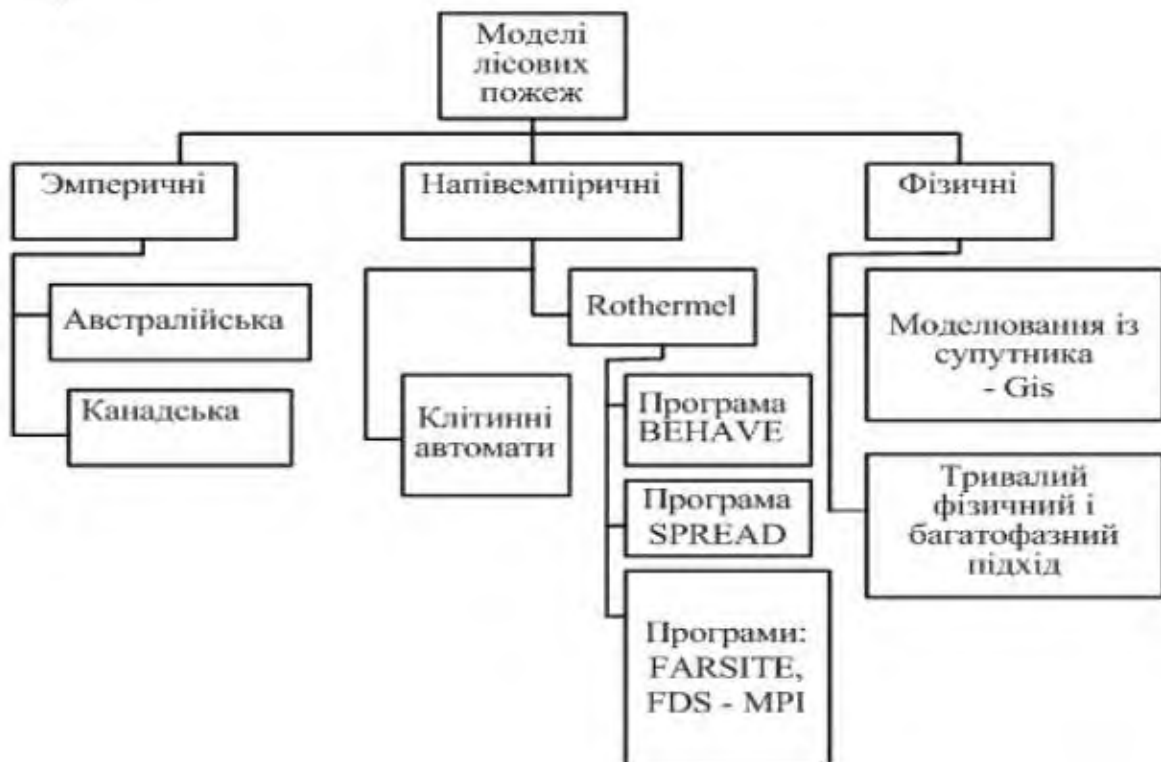


Рисунок 3.1 – Класифікація моделей лісових пожеж

Як зазначають автори [7] – «емпіричні моделі бувають статистичні і стохастичні та можуть включати дані статистики пожеж минулих років, усереднюючи параметри прогнозування лісових пожеж, отриманих з експериментальних лабораторій. Дві емпіричні моделі широко використовувалися в Австралії і Канаді. В Австралії – модель Мак Артура, що відтворювала територіальні та лісові пожежі. Вона не робила жодної спроби використовувати фізичні механізми при поширенні вогню і була виключно статистичною, описуючи параметри за результатами спостережень. Модель перевірялася в посушливих регіонах південного сходу Австралії. Лісова канадська служба 25 років проводила дослідження реальних сценаріїв поширення пожеж і сформувала Канадську систему прогнозування поведінки лісових пожеж, яка доступна нині у вигляді підручника і в електронному вигляді. Ця система містить 89 формул, отриманих дослідним шляхом і зведених до таблиць, і є однією з альтернативних моделей прогнозування пожеж».

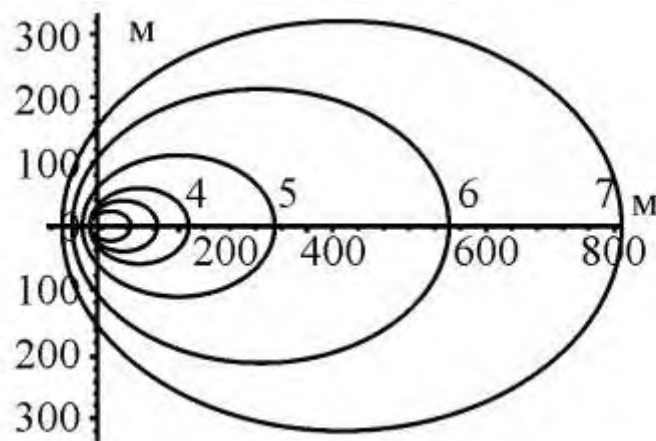


Рисунок 3.2 – Поширення пожежі відносно осередку

Напівемпіричні моделі за [8] «ґрунтуються на глобальній енергетичній рівновазі [4] (модель Франденсена 1971) і на припущенні, що енергія, яка отримується ще незгорілим паливом, пропорційна тій енергії, що вивільняється під час горіння палива. Деякі елементи моделі мають бути підібрані з результатів лабораторних експериментів з вогнем. Простота цього підходу дозволяє розробляти оперативні методи».

Останніми описані фізичні моделі лісової пожежі, які на думку авторів [8] «засновані на законах збереження маси, руху і енергії для всіх елементів системи (грунт, лісові горючі матеріали, повітря) і значно відрізняються за детальністю опису. Основними процесами є перенесення тепла (теплопровідністю, конвекцією та випромінюванням) і турбулентний потік газу. Складні хімічні реакції піролізу дерева і горіння з великим числом проміжних компонентів замінюються, як правило, ефективними процесами утворення твердих і газоподібних продуктів горіння».

3.1 Умова задачі класичної моделі лісових пожеж

Основою математичних моделей є рівняння у частинних похідних, які описують розподіл температури, швидкість горіння, теплопередачу, конвекцію і хімічні реакції під час горіння. Зазвичай моделі включають терміни дифузії (теплопередача), адвекції (вплив вітру) та реакції горіння, які взаємодіють у складній нелінійній системі. Для чисельного вирішення цих рівнянь використовуються методи, такі як метод скінченних різниць або скінченних елементів, що дозволяє розраховувати зміни вогню у часі та просторі.

Розглядається модель поширення лісової пожежі на двовимірній території. Потрібно описати поведінку пожежі в залежності від:

- швидкості вітру v ;
- вологості рослинності h ;
- горючості матеріалу f .

Модель враховує такі фактори ініціації пожежі: задання точки чи області займання, поширення полум'я: залежність швидкості фронту полум'я від вітру, вологості та горючості, припинення горіння: виснаження палива або потрапляння в область із високою вологістю.

Математична постановка може бути реалізована через рівняння реакції-дифузії:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D\nabla^2 u + R(u, v, h, f), \quad (3.1)$$

де $u(x,y,t)$ – інтенсивність горіння в точці (x,y) в момент часу t , D – коефіцієнт дифузії (залежить від горючості матеріалу), R – функція реакції (модель взаємодії полум'я з навколишніми умовами).

Ця модель демонструє базову ідею поширення полум'я у двовимірному просторі з врахуванням реакційно-дифузійного підходу. Її можна розширити додаванням напрямку вітру чи впливу географічних особливостей.

3.2 Математична модель поширення лісових пожеж

Модель описує розповсюдження вогню в середовищі з урахуванням вологості, кількості палива, дифузії (теплопередачі), реакції (горіння) та впливу вітру. Основне рівняння – це нелінійне диференціальне рівняння у частинних похідних (PDE):

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D\nabla^2 u - v \cdot \nabla u + R(u, f, m), \quad (3.2)$$

Основні змінні:

$u(x,y,t)$ - Інтенсивність горіння в точці (x,y) в момент часу t , u на $[0,1]$.

$f(x,y,t)$: Кількість доступного палива, f на проміжку $[0,1]$.

$m(x,y)$: Вологість середовища, m на проміжку $[0,1]$.

де:

$D\nabla^2 u$: Дифузійна складова, описує поширення тепла.

$v * \nabla u$: Адвекція, описує вплив вітру $v=(v_x, v_y)$ на поширення полум'я.

$R(u,f,m)$: Реакційний член, що описує процес горіння:

$$R(u, f, m) = u(1 - m)f - u^2. \quad (3.3)$$

Граничні умови:

- На краях області Ω маємо умови Діріхле:

$$u(x, y, t)|_{\partial\Omega} = 0, \quad \forall t. \quad (3.4)$$

Початкові умови:

- Інтенсивність горіння:

$$u(x, y, 0) = u_0(x, y), \quad (3.5)$$

де $u_0(x, y)$ визначає початковий осередок займання.

- Кількість палива:

$$f(x, y, 0) = f_0(x, y). \quad (3.6)$$

3.3 Чисельний розв'язок

Для розв'язку використовуємо методи дискретизації:

- **Дифузійний член:** центральна різниця.
- **Адвекція:** метод спрямованих різниць для збереження стійкості.
- **Реакція:** явний метод Ейлера.

Нехай область Ω дискретизована у сітку розміром $N \times N$ із кроками $\Delta x = \Delta y$.

Час дискретизується з кроком Δt .

Тоді рівняння дискретизується так:

$$\frac{u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^n}{\Delta t} = D \frac{u_{i+1,j}^n - 2u_{i,j}^n + u_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} + D \frac{u_{i,j+1}^n - 2u_{i,j}^n + u_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} - v_x \frac{u_{i+1,j}^n - u_{i-1,j}^n}{2\Delta x} - v_y \frac{u_{i,j+1}^n - u_{i,j-1}^n}{2\Delta y} + R_{i,j}^n. \quad (3.7)$$

Лапласіан:

$$\nabla^2 u \approx \frac{u_{i+1,j}^n + u_{i-1,j}^n + u_{i,j+1}^n + u_{i,j-1}^n - 4u_{i,j}^n}{dx^2}. \quad (3.8)$$

Адвекція:

$$\vec{v} \cdot \nabla u \approx v_x \frac{u_{i,j}^n - u_{i-1,j}^n}{dx} + v_y \frac{u_{i,j}^n - u_{i,j-1}^n}{dy}. \quad (3.9)$$

Реакція відповідно:

$$R_{i,j}^n = u_{i,j}^n (1 - m_{i,j}) f_{i,j}^n - (u_{i,j}^n)^2. \quad (3.10)$$

Оновлення кількості палива за рівнянням:

$$f_{i,j}^{n+1} = f_{i,j}^n - c u_{i,j}^n \Delta t, \quad c > 0. \quad (3.11)$$

Об'єднавши усі компоненти отримаємо рівняння:

$$u_{i,j}^{n+1} = u_{i,j}^n + dt \left[D \frac{u_{i+1,j}^n + u_{i-1,j}^n + u_{i,j+1}^n + u_{i,j-1}^n - 4u_{i,j}^n}{dx^2} - v_x \frac{u_{i,j}^n - u_{i-1,j}^n}{dx} - v_y \frac{u_{i,j}^n - u_{i,j-1}^n}{dy} + R(u_{i,j}^n, M_{i,j}, F_{i,j}) \right], \quad (3.12)$$

У наведеній математичній моделі (3.1-3.4) лапласіан обчислює дифузію тепла, адвекція враховує вплив вітру, реакція моделює згоряння із втратою палива, оновлення палива відбувається шляхом вигорання та залежить від інтенсивності u . Ця модель показує еволюцію вогню з урахуванням вітру, вологості та кількості палива.

Моделювання допомагає краще зрозуміти механізми поширення вогню і впливу різних чинників на його динаміку. Наприклад, дослідження взаємодії вітру, вологості і топографії дозволяє виявляти критичні зони, де вогонь може швидко поширюватися. Це важливо як для планування протипожежних заходів, так і для довгострокового управління лісовими екосистемами в умовах зміни клімату.

3.4 Оцінка обчислювальної складності алгоритму

Алгоритм розглядає процес поширення пожежі на регулярній сітці $N \times N$ у часових кроках T . Основні операції включають обчислення дифузії, адвекції, реакції та оновлення параметрів системи. Проведемо аналіз складності кожного етапу алгоритму.

Обчислення дифузії. Дифузія реалізується через дискретизацію лапласіана (сумування значень у сусідніх клітинках). Для кожної клітинки сітки виконується 4 операції доступу до сусідів (`roll` у NumPy) + 1 віднімання (центральна точка) + 1 ділення на крок Δx^2 . Оскільки дифузія виконується для кожної клітинки N^2 , складність цього блоку: $O(N^2)$.

Обчислення адвекції. Адвекція враховує напрямок і швидкість вітру. Для кожної клітинки 4 операції обчислення різниць у сусідніх точках (`roll` у NumPy) для осей x і y , 2 множення на компоненти швидкості, і 1 додавання для отримання

загальної адвекції. Оскільки адвекція обчислюється для N^2 точок, її складність також становить: $O(N^2)$

Обчислення реакції. Реакція враховує взаємодію між інтенсивністю горіння, вологістю та кількістю палива. Кілька базових операцій $(u(1-m)f-u^2)$ виконуються для кожної клітинки. Складність цього етапу залишається $O(N^2)$.

Оновлення параметрів. Оновлення інтенсивності горіння та зменшення кількості палива виконується як побічний ефект попередніх етапів, із незначними додатковими обчисленнями, такими як $\max_{i,j}[\bar{f}_0](\text{fuel-burn_rate}*u, 0)$. Складність: $O(N^2)$.

Часова петля. Кожен із попередніх блоків (дифузія, адвекція, реакція, оновлення параметрів) виконується в часовій петлі T разів. Тому загальна складність алгоритму є добутком складності кожного кроку на кількість часових кроків $O(T*N^2)$. Часова складність: $O(T*N^2)$, пам'яттєва складність: $O(N^2)$.

Висновок до розділу

У цьому розділі поставлено умову задачі класичної моделі лісових пожеж. Представлено математичну модель поширення лісових пожеж, що враховує напрям вітру та вологість окремих частин території. Здійснено чисельний розв'язок математичної моделі методом скінченних різниць шляхом об'єднання усі компонентів математичної моделі в результуюче рівняння.

Ця модель показує еволюцію вогню з урахуванням вітру, вологості та кількості палива (рослинності та їх залишків). Обчислювальна складність масштабується квадратично зі збільшенням N , що може стати проблемою для великих областей моделювання.

РОЗДІЛ 4. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

4.1 Підходи до реалізації

Відповідно до поставленого завдання мова програмування для створення інформаційної системи дослідження поширення лісових пожеж вибрано Python. Для обчислення та роботи з багатовимірними масивами використаємо бібліотеку NumPy(). Для розрахунку дифузії зручно використати бібліотеку SciPy. Візуалізацію даних будемо проводити за допомогою Matplotlib. Бібліотека ipywidgets допоможе створити інтерактивний інтерфейс.

Середовища для розробки, тестування та візуалізації використаємо Google Colab. Зважаючи на те, що воно є безкоштовним та доступним через веббраузер, підтримує високопродуктивні обчислення, інтегрується з популярними бібліотеками та інструментами. А також має можливості масштабування для складних задач.

4.2 Структура проєкту

Модуль математичного моделювання – ядро проєкту, що реалізує алгоритм поширення лісових пожеж. Основна задача модуля – вирішення диференціальних рівнянь у частинних похідних, які описують взаємодію ключових фізичних факторів: теплопередачі (дифузії), реакції (горіння), вологість середовища, кількість палива та вплив вітру.

Для чисельного розв'язання рівнянь застосовується метод скінченних різниць, забезпечуючи дискретизацію просторових і часових змінних. Модуль також враховує межові умови для сітки, ініціалізацію початкових параметрів (зона займання, розподіл вологості, палива) і забезпечує динамічне оновлення стану сітки на кожному часовому кроці.

Функціонал модуля реалізовано в окремому файлі `fire_model.py`, що дозволяє гнучко налаштовувати параметри моделювання: розмір сітки, час, коефіцієнти дифузії, швидкість вітру та інші параметри.

Модуль візуалізації – відповідальний за побудову графіків, анімацій та інтерактивного представлення результатів моделювання. Основна мета – забезпечити інтуїтивно зрозумілий аналіз поширення пожежі в залежності від обраних параметрів.

Модуль, реалізований у файлі `visualization.py`, включає функції для:

- Побудови тривимірних графіків, які показують інтенсивність горіння на всій сітці.
- Візуалізації двовимірних зрізів (наприклад, по центральній осі).
- Анімації процесу поширення вогню в часі.

Модуль використовує бібліотеки `Matplotlib` та `Plotly` для створення графіків, що можуть бути інтерактивними. Крім того, реалізовано функції для збереження результатів у вигляді зображень або відео.

Модуль для створення інтерактивного інтерфейсу – надає користувачу можливість взаємодії з моделлю через зручний графічний або командний інтерфейс. Модуль реалізовано у вигляді інтерактивного блокнота `interface.ipynb`, який інтегрує математичне моделювання, візуалізацію та контроль параметрів.

Використовуючи бібліотеку `ipywidgets`, користувач може змінювати основні параметри (коефіцієнт дифузії, швидкість вітру, рівень вологості, час симуляції) за допомогою слайдерів, текстових полів або меню.

Інтерфейс також дозволяє запускати симуляцію та миттєво отримувати результати у вигляді графіків чи анімацій.

Основні функції модуля інтерфейсу:

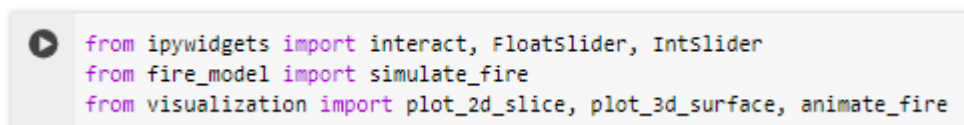
- Контроль вхідних параметрів.
- Запуск обчислень і відображення результатів.
- Збереження параметрів і результатів для подальшого аналізу.

Таблиця 3.1. Файли проєкту

№	Файл	Призначення
1.	fire_model.py	Цей файл містить основну реалізацію алгоритму математичного моделювання. Він забезпечує всі чисельні обчислення, включаючи дифузію, адвекцію та реакцію, а також обробку вихідних даних для інших модулів.
2.	visualization.py	Містить функції для побудови графіків і створення анімацій. Основна увага приділена інтерактивності та зручності аналізу результатів за допомогою бібліотек Matplotlib і Plotly.
3.	interface.ipynb	Інтерактивний блокнот об'єднує функціональність модулів математичного моделювання та візуалізації. Користувач отримує доступ до управління параметрами, запуску симуляції, аналізу та збереження результатів у зручному середовищі.

4.3 Створення інтерфейсу для моделювання

Файл `interface.ipynb` об'єднує всі функції з модулів `fire_model.py` (математичне моделювання) та `visualization.py` (візуалізація) і створює інтерактивний інтерфейс для запуску симуляції та аналізу результатів. Його завдання – забезпечити зручність для користувача, дозволяючи керувати параметрами моделі, візуалізувати результати, а також експериментувати з різними значеннями без потреби змінювати код (Рисунок 4.1).



```

from ipywidgets import interact, FloatSlider, IntSlider
from fire_model import simulate_fire
from visualization import plot_2d_slice, plot_3d_surface, animate_fire

```

Рисунок 4.1 – Імпорт бібліотек і функцій

Тут `ipywidgets` – бібліотека для створення інтерактивних віджетів (слайдерів, кнопок тощо) прямо в Jupyter Notebook. `simulate_fire` – функція з `fire_model.py`, яка виконує основне моделювання пожежі. `plot_2d_slice`, `plot_3d_surface`, `animate_fire` – функції з `visualization.py` для побудови графіків та анімацій (Рисунок 4.2).

```
# Налаштування параметрів моделі
N = 50 # Розмір сітки
time_steps = 50
dt = 0.1
D = 2.0
burn_rate = 0.1
v_x, v_y = 0.5, 0.0
```

Рисунок 4.2 – Налаштування параметрів моделі

До параметрів моделі яка симулює процес поширення лісової пожежі відносимо:

N – Розмір сітки моделі ($N \times N$).

$time_steps$ – Кількість часових кроків для моделювання.

dt – Часовий крок, що впливає на точність моделі.

D , $burn_rate$, v_x , v_y – Параметри моделі: коефіцієнт дифузії, швидкість вигорання палива та напрямок вітру (Рисунок 4.3).

```
# Запуск моделі
results = simulate_fire(N, time_steps, dt, D, burn_rate, v_x, v_y)
```

Рисунок 4.3 – Запуск моделювання

Модуль `fire_model.py` запускає симуляцію, створюючи масив `results`, який містить стан інтенсивності горіння на кожному часовому кроці. `results` буде використаний для візуалізації даних Рисунок 4.4.

```
[ ] def interactive_visualization(D=2.0, burn_rate=0.1, v_x=0.5, time_step=0):
    """
    Інтерактивна візуалізація моделі.
    """
    results = simulate_fire(N, time_steps, dt, D, burn_rate, v_x, v_y)
    plot_2d_slice(results, time_step, N)
```

Рисунок 4.4 – Функція інтерактивної візуалізації

На Рисунку 4.4 представлено фрагмент функції `interactive_visualization` – головна функція для інтерактивного налаштування параметрів моделі. Параметри – D , $burn_rate$, v_x – змінні параметри для користувача, $time_step$ – часовий крок для візуалізації (вибір конкретного стану моделі). Після налаштування параметрів

функція повторно запускає симуляцію (`simulate_fire`) і візуалізує 2D-зріз для вибраного часу за допомогою `plot_2d_slice` (Рисунок 4.5, 4.6).

```
interact(  
    interactive_visualization,  
    D=FloatSlider(value=2.0, min=0.1, max=5.0, step=0.1, description='Diffusion Coeff. '),  
    burn_rate=FloatSlider(value=0.1, min=0.01, max=0.5, step=0.01, description='Burn Rate'),  
    v_x=FloatSlider(value=0.5, min=-1.0, max=1.0, step=0.1, description='Wind X'),  
    time_step=IntSlider(value=0, min=0, max=time_steps - 1, step=1, description='Time Step')  
)
```

Рисунок 4.5 – Інтерактивний інтерфейс

```
# Створення інтерфейсу за допомогою ipywidgets  
interact(run_simulation,  
    N=widgets.IntSlider(value=50, min=10, max=100, step=10, description="Grid Size (N):"),  
    dx=widgets.FloatSlider(value=1.0, min=0.1, max=10.0, step=0.1, description="Space Step (dx, dy):"),  
    dy=widgets.FloatSlider(value=1.0, min=0.1, max=10.0, step=0.1, description="Space Step (dx, dy):"),  
    dt=widgets.FloatSlider(value=0.1, min=0.01, max=1.0, step=0.01, description="Time Step (dt):"),  
    D=widgets.FloatSlider(value=2.0, min=0.1, max=10.0, step=0.1, description="Diffusion (D):"),  
    v_x=widgets.FloatSlider(value=0.5, min=-2.0, max=2.0, step=0.1, description="Wind X Component (vx):"),  
    v_y=widgets.FloatSlider(value=0.0, min=-2.0, max=2.0, step=0.1, description="Wind Y Component (vy):"),  
    time_steps=widgets.IntSlider(value=51, min=10, max=100, step=1, description="Time Steps:"),  
    burn_rate=widgets.FloatSlider(value=0.1, min=0.01, max=1.0, step=0.01, description="Burn Rate:"))
```

Рисунок 4.6 – Інтерактивний інтерфейс

Grid Size (N):	<input type="range" value="50"/>	50
Space Ste...	<input type="range" value="1.00"/>	1.00
Space Ste...	<input type="range" value="1.00"/>	1.00
Time Step (...)	<input type="range" value="0.10"/>	0.10
Diffusion (D):	<input type="range" value="2.00"/>	2.00
Wind X Co...	<input type="range" value="0.50"/>	0.50
Wind Y Co...	<input type="range" value="0.00"/>	0.00
Time Steps:	<input type="range" value="51"/>	51
Burn Rate:	<input type="range" value="0.10"/>	0.10

Рисунок 4.7 – Слайдери керування процесом моделювання

Реалізуємо `interact()` – метод бібліотеки `ipywidgets`, який автоматично створює слайдери для взаємодії з параметрами функції.

Користувач може переміщати слайдери та миттєво бачити результат зміни параметрів на графіку. При початковому запуску всі параметри задаються значеннями за замовчуванням. Модель симуляції виконується та виводить графік

стану інтенсивності горіння на першому часовому кроці. Зміна будь-якого параметра (коефіцієнт дифузії, швидкість вітру тощо) автоматично перезапускає симуляцію з новими значеннями що забезпечує інтерактивність. Користувач може вивчати, як ці параметри впливають на динаміку поширення пожежі.

Інтерактивність дозволяє проводити експерименти в реальному часі. Користувач може досліджувати вплив фізичних параметрів (вологість, вітер, швидкість вигорання) на поширення пожежі. Інтерфейс ідеально підходить для навчальних і дослідницьких задач, адже спрощує роботу з моделлю навіть для новачків.

4.4 Реалізація моделювання

Файл `fire_model.py` є основою математичного моделювання поширення лісових пожеж. У ньому реалізовано чисельне розв'язання системи рівнянь, що враховують фізичні процеси, такі як дифузія, адвекція та реакція. Основна функція цього модуля – моделювати динаміку пожежі у вигляді масиву даних, який зберігає стан інтенсивності горіння на кожному часовому кроці.

Для початку моделювання здійснимо імпорт необхідних бібліотек командою – `import numpy as np`. Бібліотека `numpy` використовується для роботи з багатовимірними масивами та виконання чисельних обчислень. Масиви `numpy` дозволяють ефективно реалізувати чисельні методи для систем диференціальних рівнянь.

Функція `def simulate_fire(N, time_steps, dt, D, burn_rate, v_x, v_y, moisture=0.3)` з параметрами `N` - розмір сітки моделювання (кількість вузлів $N \times N$), `time_steps` - загальна кількість часових кроків, `dt` - часовий крок (менший крок збільшує точність моделі), `D` - коефіцієнт дифузії (теплопровідність середовища), `burn_rate` - швидкість згоряння палива, `v_x`, `v_y` - компоненти швидкості вітру, `moisture` – рівень вологості середовища (впливає на реакцію горіння). Функція повертає масив `results` (3D-масив: `time_steps x N x N`), який містить дані про стан інтенсивності горіння в кожній точці сітки на кожному часовому кроці.

На кожному часовому кроці розраховуються функції дифузії, адвекції та реакції.

Дифузія (теплопередача) – розрахунок лапласіана для обчислення теплопередачі. На Рисунок 4.8 `np.roll` – зсуває масив `u` вказаному напрямку, що дозволяє уникнути складного врахування граничних умов.

```
[ ] laplacian = (  
    np.roll(u, 1, axis=0) + np.roll(u, -1, axis=0) +  
    np.roll(u, 1, axis=1) + np.roll(u, -1, axis=1) -  
    4 * u  
    ) / dx**2
```

Рисунок 4.8 – Реалізація дифузії

Адвекція (вплив вітру) враховує напрямок і швидкість вітру (перенос енергії у напрямку потоку). Реакція описує (Рисунок 4.9) вигорання лісової підстилки залежно від вологості та інтенсивності горіння.

```
advection = -v_x * (np.roll(u, -1, axis=1) - np.roll(u, 1, axis=1)) / (2 * dx) \  
            -v_y * (np.roll(u, -1, axis=0) - np.roll(u, 1, axis=0)) / (2 * dy)
```

Рисунок 4.9 – Реалізація адвекції

Оновлення стану моделювання – загальний вплив від дифузії, адвекції та реакції додається до нового стану `u_new`. На Рисунок 4.10 представлено як оновлюється стан палива в кожній точці сітки.

```
u_new += dt * (D * laplacian + advection + reaction)  
u_new = np.clip(u_new, 0, 1) # Обмеження інтенсивності горіння між 0 і 1  
fuel = np.maximum(fuel - burn_rate * u * dt, 0) # Зменшення кількості палива
```

Рисунок 4.10 – Оновлення стану моделювання

Поточний стан `u` зберігається в `results` на кожному часовому кроці. Повертається список `results` для подальшого аналізу та візуалізації.

4.5 Візуалізація результатів моделювання

Файл `visualization.py` відповідає за візуалізацію результатів моделювання поширення лісових пожеж. Він реалізує побудову графіків, анімацій та

інтерактивних візуалізацій, щоб полегшити аналіз динаміки поширення пожежі. Основна увага приділяється зручності роботи користувача та можливості аналізу даних у різних часових зрізах.

Для створення статичних графіків та анімацій використовуємо `matplotlib`. Для візуалізації тривимірних графіків використовуємо `mpl_toolkits.mplot3d`. Для інтерактивних візуалізацій використовуємо `plotly.graph_objects`. Для прикладу наведемо реалізацію методу побудови 2D-зрізу даних для заданого якогось часового кроку. Параметри функції – `data` це результати моделювання (3D масив: `time_steps x N x N`), `time_step` - часовий крок для візуалізації, `cmap` - кольорова схема (за замовчуванням 'hot'). Функція Рисунок 4.11 повертає графік 2D зрізу.

```
def plot_2d_slice(data, time_step, cmap='hot'):  
    plt.figure(figsize=(8, 6))  
    plt.imshow(data[time_step], cmap=cmap, origin='lower')  
    plt.colorbar(label='Burning Intensity')  
    plt.title(f'2D Slice at Time Step {time_step}')  
    plt.xlabel('X Position')  
    plt.ylabel('Y Position')  
    plt.show()
```

Рисунок 4.11 – Функція виведення графіку

Функція побудови теплової карти (heatmap) для аналізу інтенсивності горіння у двовимірному просторі на заданому часовому кроці. Результат - статичний графік 2D-зрізу, що показує інтенсивність горіння.

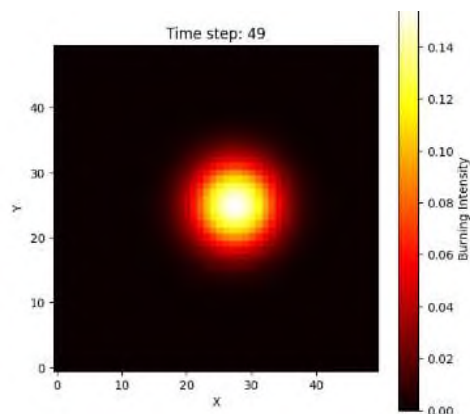


Рисунок 4.12 – Результат горіння у двовимірному просторі

Функція (Рисунку 4.12) для побудови тривимірного графіка інтенсивності горіння. Параметри - `data` це результати моделювання (3D масив: `time_steps x N x N`), `time_step` - часовий крок для візуалізації. Повертає 3D-графік.

```

def plot_3d_surface(data, time_step):
    X, Y = np.meshgrid(np.arange(data.shape[1]), np.arange(data.shape[2]))
    Z = data[time_step]

    fig = plt.figure(figsize=(10, 8))
    ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
    surf = ax.plot_surface(X, Y, Z, cmap='viridis')
    fig.colorbar(surf, ax=ax, label='Burning Intensity')
    ax.set_title(f'3D Surface at Time Step {time_step}')
    ax.set_xlabel('X Position')
    ax.set_ylabel('Y Position')
    ax.set_zlabel('Intensity')
    plt.show()

```

Рисунок 4.13 – Код, що реалізує побудову 3D – графіку

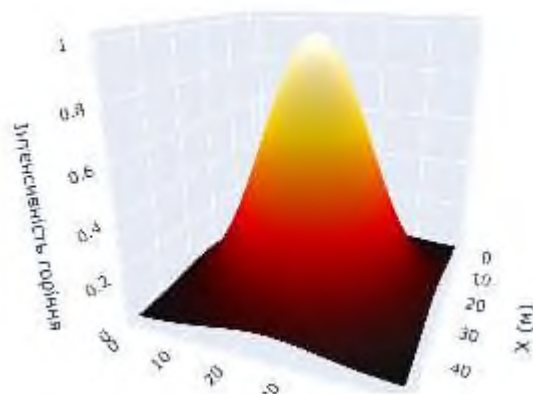


Рисунок 4.14 – Візуалізація 3D – графіку. Поверхні поширення пожежі

Наведемо реалізацію методу для створення анімації динаміки поширення пожежі. Параметри – data - результати моделювання (3D масив: time_steps x N x N), interval - інтервал між кадрами (мс), cmap - кольорова схема.

```

def create_animation(data, interval=100, cmap='hot', save_as=None):
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 6))
    im = ax.imshow(data[0], cmap=cmap, origin='lower')
    plt.colorbar(im, ax=ax, label='Burning Intensity')

    def update(frame):
        im.set_data(data[frame])
        ax.set_title(f'Time Step {frame}')
        return [im]

    anim = FuncAnimation(fig, update, frames=len(data), interval=interval, blit=True)
    if save_as:
        anim.save(save_as, writer='imagemagick')
    plt.show()

```

Рисунок 4.15 – Метод для створення анімації динаміки поширення пожежі

Результатом роботи є анімоване відображення поширення пожежі в просторі.

4.6 Результати моделювання

Моделювання поширення лісових пожеж дозволяє аналізувати динаміку горіння під впливом різних параметрів наприклад: BurnRate (швидкість вигорання), TimeStep (часовий крок), WindX напрямок вітру і поширення пожежі. Нижче наведено докладний опис впливу цих параметрів, а також графіки, що ілюструють зміни.

Burn Rate визначає, як швидко згорає доступне паливо. Вищі значення цього параметра призводять до швидшого згасання вогню, оскільки паливо витрачається інтенсивніше. Низькі значення дозволяють пожежі тривати довше, але з меншою інтенсивністю. Графіки Рис. 4.16 з різними значеннями Burn Rate демонструють, як швидкість вигорання впливає на поширення вогню в просторі.

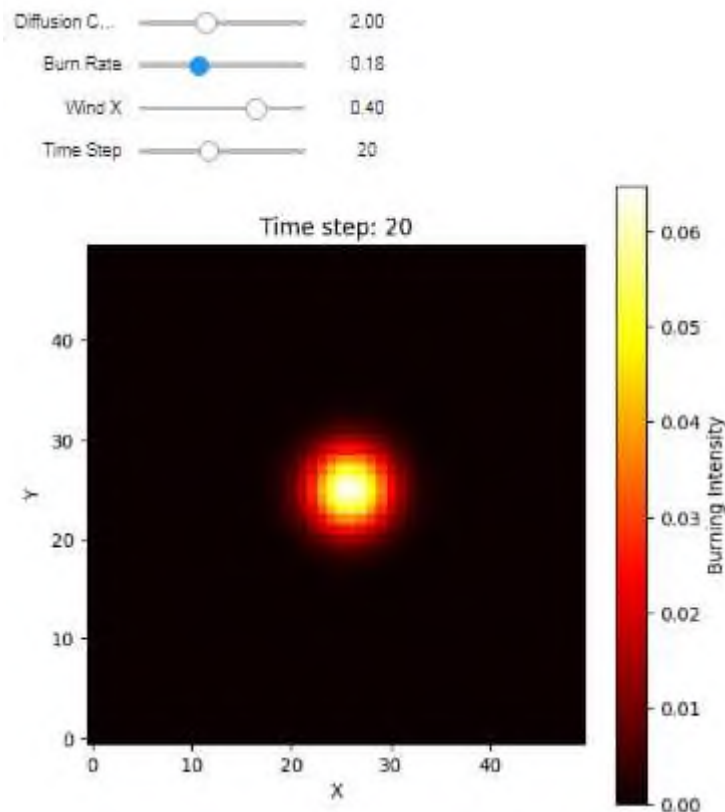
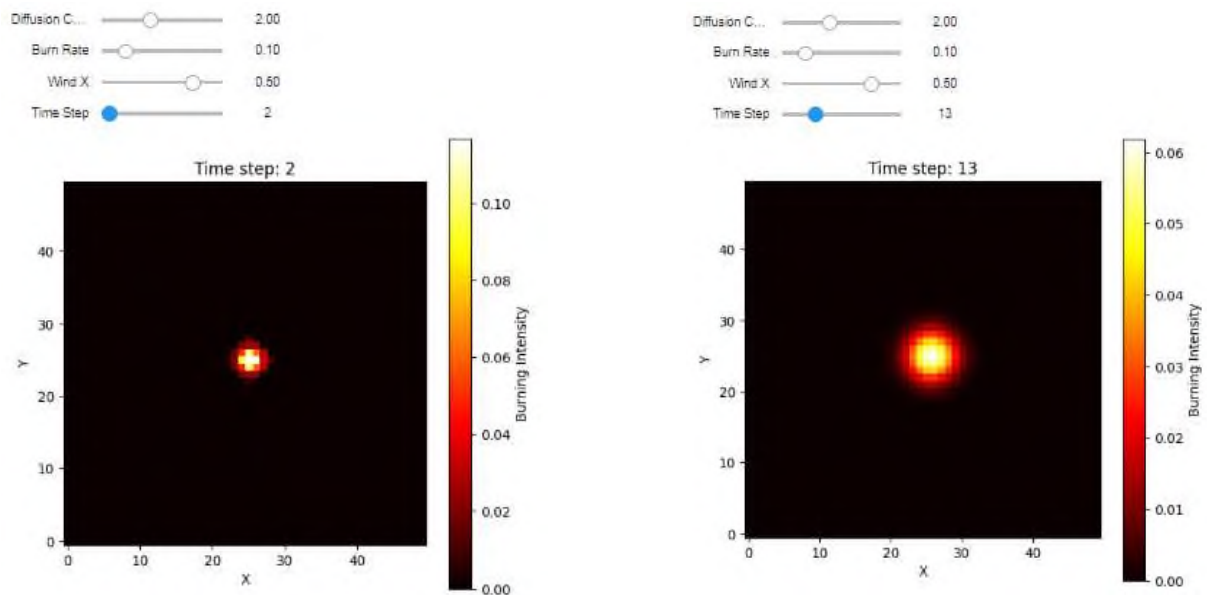


Рисунок 4.16 – Демонстрація вигорання в просторі

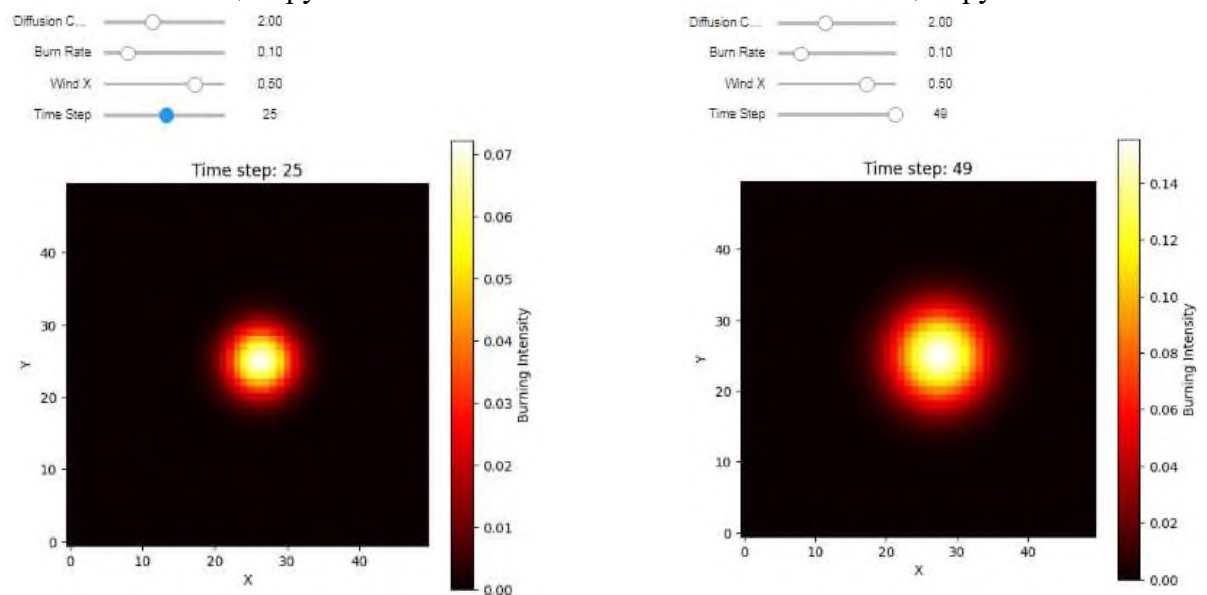
Низький Burn Rate (0.01-0.05) - огонь повільно зменшується, залишаючи більше часу для поширення на нові області. Високий Burn Rate (0.2-0.5) пожежа гасне швидше, через що активна зона горіння залишається меншою.

На початкових часових кроках (Time Step = 0-10) вогонь інтенсивно поширюється від початкового осередку Рисунок 4.17. Інтенсивність горіння максимальна в центрі.



а. – Для Time Step = 2: Вогонь тільки починає розповсюджуватися, висока інтенсивність біля центру.

б. – Для Time Step = 13: Вогонь починає розповсюджуватися, висока інтенсивність біля центру.



в. – Для Time Step = 25: Пожежа розширилася до максимальної площі, але інтенсивність горіння стала більш рівномірною.

г. – Для Time Step = 49: Інтенсивність горіння майже зникла, видно вигорілі області.

Рисунок 4.17 – Поширення пожежі на різних часових кроках

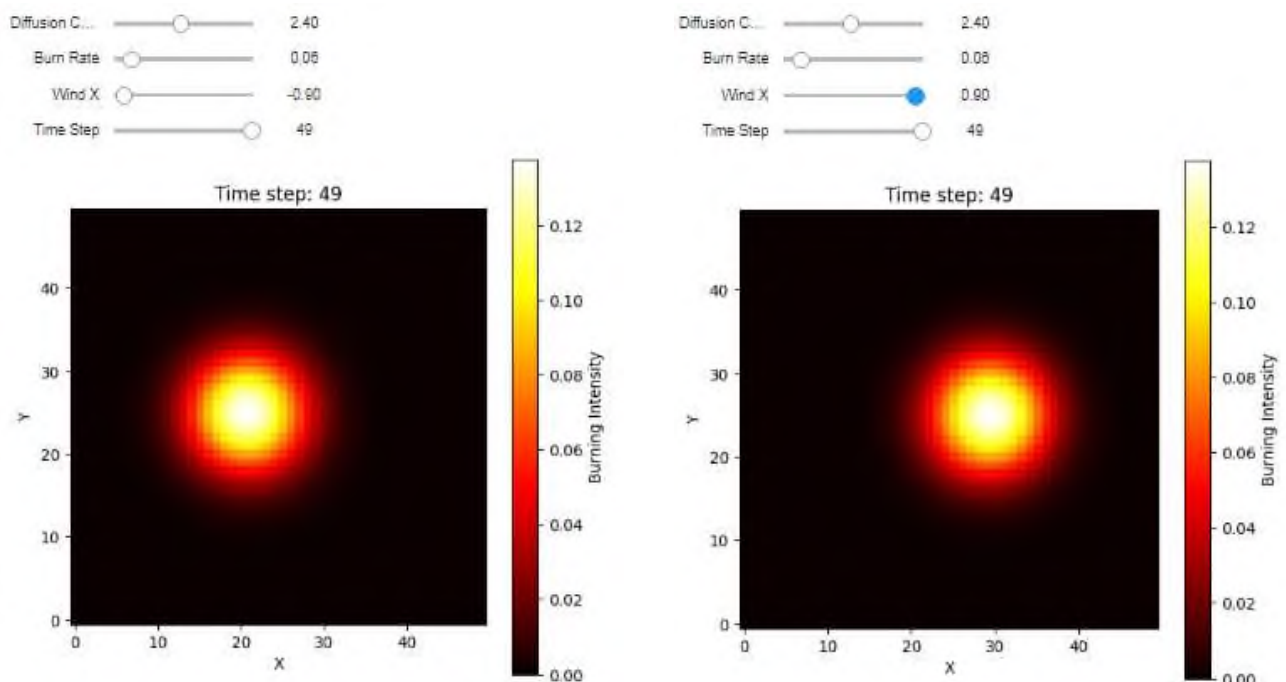
Time Step вказує на конкретний момент часу, для якого виводиться розподіл інтенсивності горіння. З часом пожежа змінює динаміку: спочатку активно

розростається, потім її інтенсивність зменшується через витрату палива та вплив вологості.

На середніх часових кроках (Time Step = 20-30) (Рисунок 4.17.б, в) пожежа досягає найбільшого просторового розповсюдження. У центрі осередку інтенсивність горіння починає зменшуватися через витрату палива. На пізніх часових кроках (Time Step = 40-50) (Рисунок 4.17.г) пожежа поступово згасає, залишаючи зони з низькою інтенсивністю або повністю вигорілими ділянками.

При моделюванні з різними комбінаціями Burn Rate та Time Step можна спостерігати, як швидкість вигорання впливає на динаміку пожежі на різних етапах. Високий Burn Rate і ранні Time Step (0-10): пожежа швидко набирає інтенсивність, але через високі втрати палива швидко слабшає. Низький Burn Rate і пізні Time Step (40-50): пожежа триває довше, але розвивається повільніше, залишаючи більше часу для її поширення.

Вплив параметра Wind X на динаміку поширення пожежі.



а. Форма осередку значно витягується у західному напрямку.

б. Пожежа охоплює зону в східному напрямку.

Рисунок 4.18 – Поширення пожежі при різних параметрах вітру

Таблиця 3.2 – Вплив параметру Wind X на динаміку поширення пожежі

Значення	Опис динаміки поширення пожежі	Особливості графіків
Wind X = 0 (без вітру)	- Пожежа поширюється симетрично у вигляді концентричних кіл. - Найвища інтенсивність горіння в центрі. - Рівномірне розповсюдження в усіх напрямках.	Форма осередку залишається круглою на всіх часових кроках.
Wind X > 0 (вітер на схід)	Пожежа поширюється швидше у східному напрямку (вправо).	
Wind X = 0.5	- На ранніх етапах (Time Step = 10) пожежа має злегка асиметричну форму. - На пізніх етапах (Time Step = 30, 50) зона горіння витягується в східному напрямку.	Східна частина осередку значно більша, поширення в західному напрямку сповільнюється.
Wind X = 1.0 (сильний вітер)	- Горіння концентрується у східній частині. - Центр осередку швидше вигоряє. - Інтенсивність горіння підсилюється у східному напрямку.	Пожежа охоплює зону в східному напрямку.
Wind X < 0 (вітер на захід)	Пожежа поширюється у західному напрямку (вліво).	
Wind X = -0.5	- Пожежа поступово набуває асиметричної форми. - Основне поширення горіння зміщується в західному напрямку.	Зони горіння у східному напрямку залишаються меншими за площею.
Wind X = -1.0 (сильний вітер)	- Пожежа сильно витягується у західному напрямку. - Зона поширення у східному напрямку є мінімальною. - Основна інтенсивність горіння зосереджується у вузькій західній смузі.	Форма осередку значно витягується у західному напрямку.

Таблиця 3.2 демонструє залежність динаміки поширення пожежі від горизонтальної складової вітру, а також зміни, які можна спостерігати на відповідних графіках.

Взаємодія Wind X і Time Step. Для фіксованих значень Time Step можна спостерігати зміну форми осередку пожежі. На ранніх часових кроках вплив вітру менш виражений, пожежа залишається майже симетричною. На середніх та пізніх

часових кроках вітровий зсув значно деформує осередок горіння, створюючи витягнуті форми, які залежать від напрямку та сили вітру (Рисунок 4.19).

```
import numpy as np
import plotly.graph_objects as go

# Генерація даних
N = 50
X, Y = np.meshgrid(np.arange(N), np.arange(N))
Z = np.exp(-((X - N/2)**2 + (Y - N/2)**2) / 200) # Умовна інтенсивність пожежі

# Побудова тривимірного графіка
fig = go.Figure(data=[go.Surface(z=Z, x=X, y=Y, colorscale='hot')])

fig.update_layout(
    title='Розподіл інтенсивності пожежі',
    scene=dict(
        xaxis_title='X (м)',
        yaxis_title='Y (м)',
        zaxis_title='Інтенсивність горіння'
    )
)
fig.show()
```

Рисунок 4.19 – Виведення результату у 3 вимірному графіку

Розподіл інтенсивності пожежі

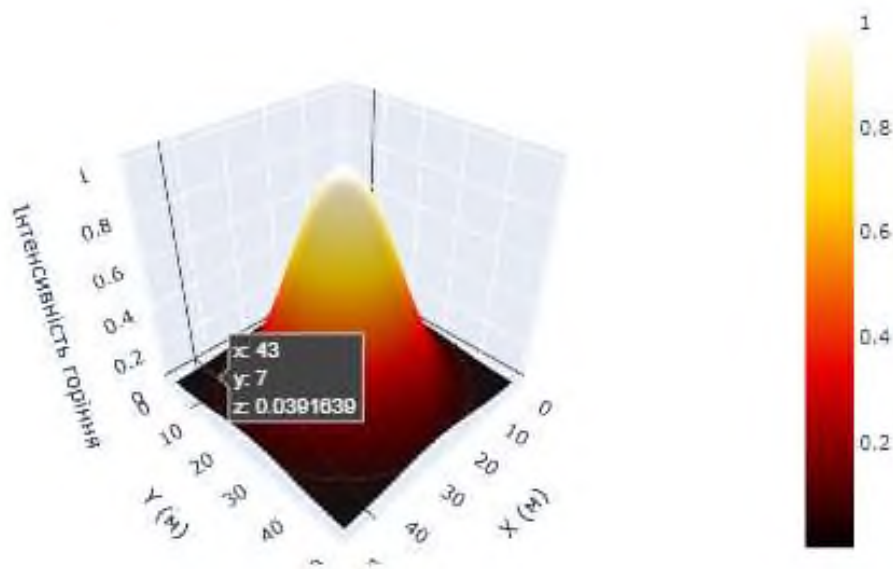


Рисунок 4.20 – Інтенсивність пожежі у вказаній точці при $z=0,039$

Розподіл інтенсивності пожежі

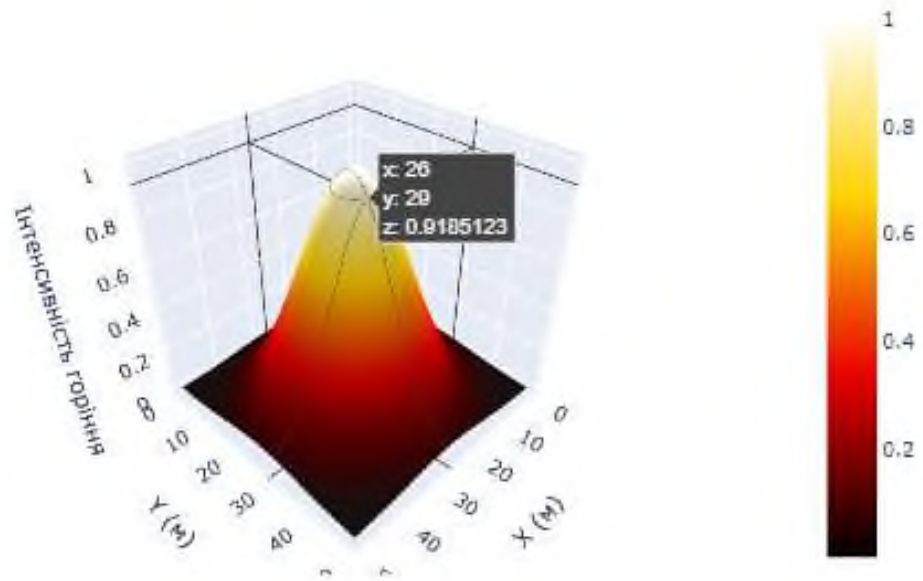


Рисунок 4.21 – Інтенсивність пожежі у вказаній точці при $z=0,091$

Розподіл інтенсивності пожежі

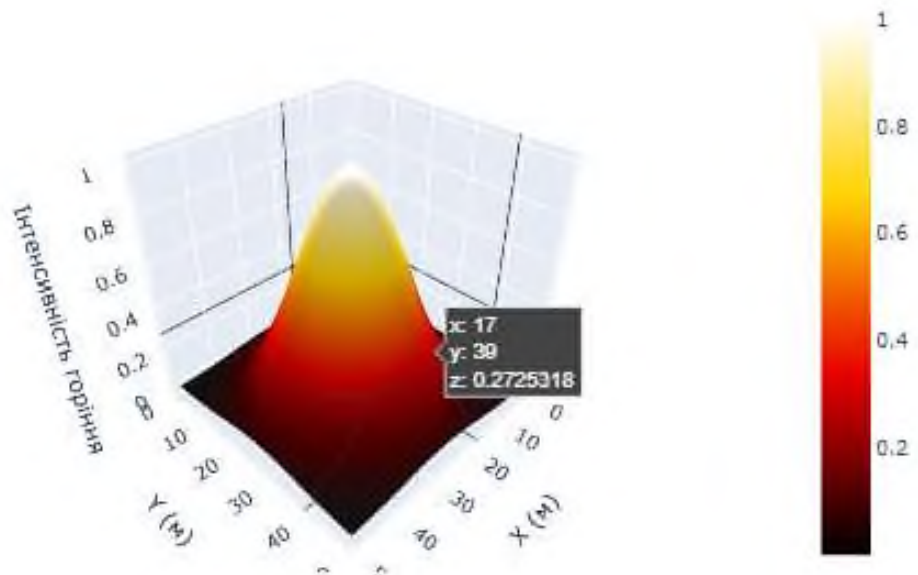
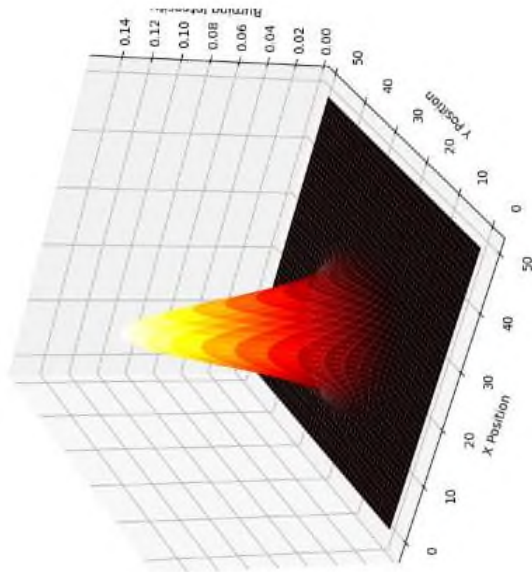


Рисунок 4.22 – Інтенсивність пожежі у вказаній точці при $z=0,027$

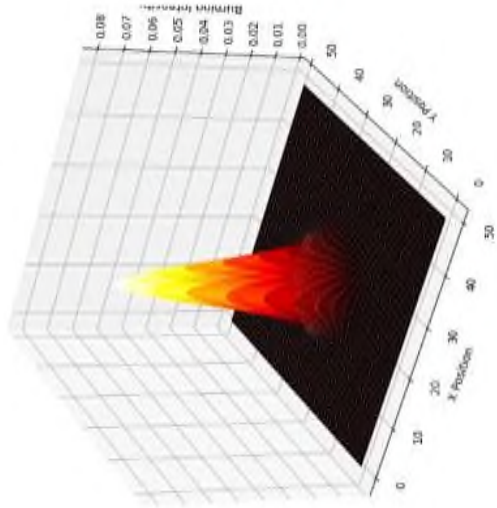
3D Fire Spread at Time Step 49



а - На пізніх часових кроках
(Time Step = 50)

Пожежа зосереджується у вузькій західній смужі, утворюючи витягнутий осередок з високою інтенсивністю.

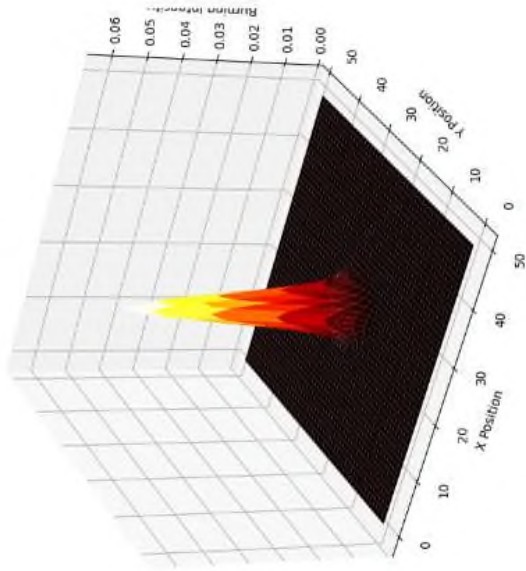
3D Fire Spread at Time Step 30



б - На середніх часових кроках
(Time Step = 30)

Основна зона горіння витягується в західний бік, в східному напрямку інтенсивність мінімальна.

3D Fire Spread at Time Step 10



в - На ранніх часових кроках
(Time Step = 10)

Горіння починається в центральній частині сітки, але вже видно зсув інтенсивності в західному напрямку.

Рисунок 4.23 – Динаміка пожежі відносно напрямку вітру

Висновок до розділу

У даному розділі було розроблено та описано програмно-алгоритмічне забезпечення для математичного моделювання поширення лісових пожеж. Було створено основний модуль, що реалізує чисельний алгоритм моделювання з використанням методу скінченних різниць. Алгоритм враховує такі фактори, як інтенсивність горіння, вплив вітру, вологість середовища та кількість палива. Окремий модуль для візуалізації забезпечує графічне представлення результатів моделювання у вигляді двовимірних та тривимірних графіків, що сприяє полегшенню аналізу поведінки пожежі залежно від заданих параметрів. Інтерактивний блокнот надає можливість користувачам змінювати параметри моделі в реальному часі та спостерігати за результатами у зручному середовищі.

Розроблене програмно-алгоритмічне забезпечення є ефективним інструментом для аналізу поширення лісових пожеж та може бути використане для прогнозування їх динаміки. Гнучкість моделі дозволяє легко адаптувати її для різних умов, що робить її універсальним рішенням для досліджень та практичного застосування у сфері моніторингу лісових ресурсів. Це забезпечує як наукову цінність розробки, так і її потенціал для інтеграції в реальні системи управління та попередження лісових пожеж.

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ

Цей розділ спрямований на проведення маркетингового аналізу стартап-проєкту. Основна мета полягає у визначенні ключових можливостей для виходу проєкту на ринок і розробці ефективних стратегій для успішного впровадження програмної системи математичного моделювання та візуалізації поширення лісових пожеж.

5.1 Опис ідеї проєкту

У цьому розділі представлено аналіз економічної обґрунтованості впровадження стартап-проєкту, спрямованого на розробку системи математичного моделювання та візуалізації поширення лісових пожеж. Особливістю роботи є створення програмної системи, яка дозволяє ефективно аналізувати динаміку поширення пожеж залежно від різних параметрів, таких як вологість, кількість палива, вплив вітру та теплопередача. Впровадження цієї системи очікується сприяти підвищенню екологічної безпеки, зниженню економічних втрат від лісових пожеж, а також покращенню процесів планування та прийняття рішень у сфері управління природними ресурсами та надзвичайними ситуаціями.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап-проєкту

Напрямок застосування	Вигоди для користувача
Екологічний моніторинг і прогнозування природних катастроф	<ul style="list-style-type: none">- Своєчасне попередження поширення лісових пожеж.- Зниження збитків завдяки ефективному прогнозуванню.- Оцінка впливу пожежі на екосистему.
Планування заходів із запобігання та боротьби з лісовими пожежами	<ul style="list-style-type: none">- Оптимізація ресурсів для боротьби з пожежами.- Підвищення ефективності розподілу техніки та персоналу.
Наукові дослідження в галузі екології та кліматології	<ul style="list-style-type: none">- Можливість аналізу впливу різних параметрів на поширення пожеж.- Вивчення взаємозв'язків між кліматичними умовами та динамікою пожеж.

Продовження таблиці 5.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Освіта та тренування фахівців з пожежної безпеки	- Використання моделі для навчання студентів і спеціалістів. - Імітація реальних сценаріїв для відпрацювання рішень у кризових ситуаціях.
Страхові компанії	- Оцінка ризиків для визначення страхових внесків і компенсацій. - Розробка моделей оцінки збитків від лісових пожеж.
Сільське та лісове господарство	- Планування захисних заходів у прифронтних зонах. - Зменшення втрат сільськогосподарських і лісових угідь від пожеж.
Державне управління та розробка політики у сфері природоохоронної діяльності	- Розробка регіональних стратегій боротьби з пожежами. - Забезпечення довгострокового сталого розвитку.
Розробка геоінформаційних систем (ГІС)	- Інтеграція моделі до ГІС для створення інтерактивних карт ризиків. - Просторова аналітика для ідентифікації найбільш вразливих зон.

У таблиці 5.2 наведено сильні, слабкі та нейтральні характеристики ідеї проекту.

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	Порівняння концепції проекту з продуктами можливих конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Даний проєкт	Конкурент 1	Конкурент 2	Конкурент 3			
1	Форма використання	Десктоп	Веб	Мобільний додаток	Десктоп			+
2	Собівартість	Низька	Середня	Середня	Висока		+	
3	Необхідність інтернету	-	+	+	+		+	
4	Крос-платформеність	-	+	-	-	+		

5.2 Аналіз технологічних можливостей реалізації ідей проєкту

У даному підрозділі було проведено аналіз технологій, які можуть бути використані для реалізації стартап-проєкту. У таблиці 5.3 наведено технологічні аспекти концепції проєкту.

Таблиця 5.3 – Технологічна здійсненність ідеї проєкту

№ п/п	Ідея проєкту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Математичне моделювання поширення лісових пожеж	- Python (NumPy, SciPy) для реалізації чисельних методів.- Диференціальні рівняння для опису процесів дифузії, адвекції.	Відкриті бібліотеки доступні в інтернеті.Чисельні алгоритми широко використовуються у наукових дослідженнях.	Вільний доступ до Python та наукових бібліотек.
2	Побудова двовимірної та тривимірної візуалізації результатів моделювання	- Matplotlib для двовимірних графіків.- Plotly або Mayavi для інтерактивної тривимірної графіки.- OpenGL для рендерингу.	Популярні інструменти, що активно використовуються для візуалізації у сфері науки і техніки.	Доступні у відкритому доступі. Мають детальну документацію та велику спільноту розробників.
3	Створення інтерактивного інтерфейсу	- Jupyter Notebook для створення інтерактивного середовища.- Ipywidgets для інтерактивних слайдерів та кнопок.	Відкритий доступ до Jupyter Notebook та Ipywidgets, які є стандартами для інтерактивного моделювання в науці.	Легко встановлюються через менеджери пакетів (pip, conda).
4	Зберігання та обробка даних для аналізу та відтворення результатів моделювання	- HDF5 або CSV для зберігання даних.- Pandas для обробки даних.- NumPy для оптимізації масивів даних.	Технології широко використовуються у наукових дослідженнях і мають відкриті бібліотеки.	Вільний доступ до інструментів обробки даних.

Дана таблиця демонструє, що основні технології для реалізації стартап-проєкту доступні у відкритих бібліотеках і не вимагають значних витрат на ліцензування, що підтверджує технологічну здійсненність ідеї проєкту.

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

У даному підрозділі опишемо ринкові можливості та загрози для впровадження системи моделювання поширення лісових пожеж.

№ п/п	Аспект аналізу	Деталізація
1	Цільова аудиторія	Державні установи (лісові господарства, служби ДСНС), приватні компанії, екологічні організації, науково-дослідні установи, аграрний сектор.
2	Потреби ринку	Ефективний моніторинг та прогнозування лісових пожеж, оптимізація ресурсів для їх гасіння, створення моделей попередження катастрофічних наслідків пожеж.
4	Переваги продукту	- Використання точних математичних моделей;- Гнучкість налаштування параметрів;- Інтерактивний інтерфейс;
5	Обсяг ринку	Величезний потенціал у глобальному масштабі. Лісові пожежі є проблемою у США, Австралії, Канаді, країнах Європи та Азії.
6	Шляхи монетизації	- Ліцензування для державних служб і компаній;- Продаж SaaS-доступу до моделі;- Консультаційні послуги для адаптації моделі під конкретні потреби.
7	Ризики на ринку	- Низька поінформованість користувачів;- Можливість затримок в інтеграції;- Висока конкуренція у сфері моделювання та прогнозування природних явищ.
8	Екологічний контекст	Сприяння зменшенню збитків від лісових пожеж та збереженню екосистем, що може посилити інтерес екологічних організацій та грантових фондів.
9	Потенційні партнери	- Університети та наукові установи для розробки;- Державні служби надзвичайних ситуацій для впровадження;- Приватні ІТ-компанії для підтримки технологій.
10	Рекламна стратегія	Розробка демонстраційної версії продукту для привернення уваги цільових клієнтів, співпраця з міжнародними організаціями, участь у конференціях та виставках.

Цей аналіз ринкових можливостей демонструє значний потенціал проєкту завдяки поєднанню сучасних технологій, високого попиту та відсутності аналогічних доступних рішень на багатьох ринках.

Опис потенційної аудиторії для інтелектуальної системи онлайн розпізнавання фото знімків представлено у Таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Моніторинг і прогнозування лісових пожеж	Державні лісові господарства, служби ДСНС	Орієнтовані на зменшення витрат, пріоритет державного фінансування	Надійність моделі, висока точність прогнозу, легкість інтеграції в існуючі системи
2	Екологічний моніторинг	Екологічні організації, наукові установи	Сфокусовані на збереженні екосистем, частіше шукають грантове фінансування	Можливість налаштування параметрів моделі, доступ до даних та аналітики
3	Оптимізація використання ресурсів для гасіння пожеж	Приватні охоронні компанії, страхові компанії	Орієнтовані на мінімізацію економічних втрат	Висока швидкість розрахунків, економічна ефективність, підтримка звітності
4	Моделювання природних катастроф	Науково-дослідні центри, університети	Використовують продукт для навчання та досліджень, не завжди мають значний бюджет	Інтерактивність, документація для навчання, підтримка довгострокових симуляцій
5	Виконання регуляторних вимог	Аграрний сектор, компанії з управління земельними ресурсами	Прагнуть відповідати нормативним стандартам та мінімізувати штрафи	Гнучкість моделі для різних типів земель, підтримка звітності за нормативами

Таблиця відображає різноманітність цільових сегментів ринку, які мають специфічні потреби та вимоги до продукту, що обумовлює необхідність гнучкого підходу до адаптації програмного забезпечення.

Щодо факторів загроз, то до них можна віднести відсутність попиту на неточне розпізнання. Можлива реакція компанії на відповідні фактори та їх зміст поданого у Таблиці 5.6.

Таблиця 5.6. – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція	Поява подібних рішень від конкурентів, які можуть запропонувати нижчу вартість або ширший функціонал	Розробка унікальних функцій продукту, постійне вдосконалення технології, пропозиція безкоштовних демонстраційних версій
2	Технологічні обмеження	Недостатня потужність обчислювальної інфраструктури користувачів для запуску моделі	Оптимізація алгоритмів, пропозиція хмарного розв'язання, яке мінімізує потреби в локальних ресурсах
4	Залежність від точності даних	Низька якість або відсутність актуальних даних про погодні умови, ландшафт чи вологість середовища	Інтеграція з додатковими джерелами даних, такими як супутникові знімки чи локальні датчики, розробка моделей для прогнозування
6	Юридичні обмеження	Регуляторні або ліцензійні бар'єри, що ускладнюють вихід на ринок	Вивчення правових вимог на початковому етапі, залучення юридичних консультантів, відповідність стандартам
7	Економічна нестабільність	Зниження купівельної спроможності клієнтів у зв'язку з економічними труднощами	Запровадження гнучкої системи знижок, адаптація продукту під різні цінові сегменти

У таблиці 5.6 фактори загроз є важливим аспектом аналізу ризиків при запуску стартап-проєкту. Основні загрози включають конкуренцію, технологічні та економічні обмеження, залежність від даних і регуляторні вимоги. Щоб мінімізувати ці ризики, компанія повинна зосередитися на постійному вдосконаленні продукту, адаптації до потреб клієнтів, розробці гнучкої цінової політики та забезпеченні відповідності нормативним вимогам. Такий підхід

дозволить підвищити конкурентоспроможність і покращити імідж стартапу на ринку.

Фактори можливостей можуть визначати успіх та конкуренто-спроможність системи розпізнавання фото знімків на ринку наведено у Таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зростання попиту на технології	Підвищений інтерес до цифрових рішень у сфері моніторингу та управління лісовими ресурсами	Активна рекламна кампанія, демонстрація можливостей продукту на тематичних виставках і конференціях
2	Державна підтримка	Програми субсидій чи грантів для екологічних стартапів	Участь у грантових конкурсах, співпраця з державними структурами
3	Екологічна свідомість	Збільшення уваги до екологічних проблем і попиту на технології, які допомагають у збереженні природних ресурсів	Позиціонування продукту як екологічно значущого рішення, залучення партнерів у сфері екології
4	Розвиток хмарних технологій	Розширення доступу до дешевих і потужних хмарних обчислювальних сервісів	Інтеграція з хмарними платформами для зменшення вимог до апаратного забезпечення користувачів
5	Інтеграція з GIS-технологіями	Використання геоінформаційних систем (GIS) для прогнозування пожеж і аналізу територій	Розробка модулів для інтеграції з популярними GIS-платформами (ArcGIS, QGIS тощо)
6	Розширення ринку	Можливість виходу на міжнародний ринок, особливо в регіонах з високим ризиком лісових пожеж	Дослідження ринків з високим попитом, адаптація продукту до локальних умов
9	Розвиток мобільних платформ	Популяризація мобільних додатків для управління процесами	Створення мобільної версії продукту для оперативного доступу до прогнозів і результатів аналізу
10	Залучення венчурних інвестицій	Зростання інтересу інвесторів до екологічних та інноваційних стартапів	Підготовка інвестиційного пакету, презентація продукту перед потенційними інвесторами

Фактори можливостей створюють сприятливе середовище для успішної реалізації стартап-проєкту. Основні можливості включають зростання попиту на цифрові рішення, державну підтримку, екологічну свідомість, розвиток хмарних і мобільних технологій, а також партнерство з великими компаніями. Реакція компанії на ці фактори повинна бути спрямована на активну інтеграцію сучасних технологій, розширення ринків і створення стратегічних партнерств, що дозволить збільшити конкурентоспроможність і сприяти сталому розвитку проєкту.

Таблиця 5.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Конкуренція	Присутність інших стартапів або компаній, які пропонують схожі технологічні рішення у сфері моніторингу природних ресурсів	Унікалізація продукту (впровадження нових функцій, інтеграція інновацій), активна рекламна кампанія, залучення експертів для покращення алгоритмів
2. Регіональна конкуренція	Конкуренція між локальними компаніями, які адаптовані до особливостей конкретного регіону	Проведення ринкових досліджень для адаптації продукту до локальних умов, встановлення конкурентної ціни, співпраця з місцевими організаціями та партнерами
3. Внутрішньогалузева конкуренція	Боротьба за клієнтів серед компаній, які працюють у сфері управління лісовими ресурсами та екологічного моніторингу	Впровадження додаткових сервісів (наприклад, інтеграція з GIS, мобільні додатки), підвищення зручності та інтуїтивності користування системою

Ступеневий аналіз конкуренції вказує на наявність кількох рівнів конкурентного середовища: загальна конкуренція, регіональна конкуренція та внутрішньогалузева конкуренція. Щоб залишатися конкурентоспроможною, компанія повинна інвестувати в інновації, забезпечити адаптацію продукту до локальних умов і потреб, а також підтримувати високу якість обслуговування клієнтів.

5.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту

Таблиця 5.9 демонструє основні цільові групи потенційних споживачів стартап-проєкту та визначає їх ключові потреби, мотивацію до використання продукту, вплив продукту на діяльність споживачів і стратегії залучення.

Таблиця 5.9 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Цільова група споживачів	Ключові потреби	Мотивація до використання продукту	Потенційний вплив продукту на споживача	Стратегія залучення цільової групи
1	Державні служби надзвичайних ситуацій	Прогнозування поширення пожеж; оцінка ризиків	Зменшення витрат на ліквідацію пожеж;	Зменшення збитків від пожеж, оперативність реагування	Презентація системи; демонстрація успішних кейсів
2	Лісо-господарські підприємства	Збереження лісових ресурсів; моніторинг стану	Мінімізація втрат деревини; довгострокове планування	Оптимізація роботи підприємства; підвищення економічних вигод	Розробка спеціальних функцій для відображення лісових масивів
3	Дослідницькі організації	Аналіз впливу зовнішніх факторів на пожежі	Отримання точних даних для наукових досліджень	Підвищення якості наукових прогнозів	Надання пробного доступу до системи
4	Екологічні організації	Збереження екосистем; зменшення впливу пожеж	Планування заходів щодо захисту навколишнього середовища	Покращення екологічної ситуації	Інтеграція інструментів аналізу ризиків у їхню діяльність
5	Навчальні заклади	Викладання теми пожежної безпеки	Вдосконалення навчальних матеріалів; ілюстрація процесів	Підвищення зацікавленості студентів; підготовка фахівців	Надання освітньої ліцензії
6	Громадські організації	Контроль державних служб та організацій	Дослідження ситуації для оформлення висновків	Покращення екологічної ситуації	Надання пробного доступу до системи

Таблиця 5.10 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Швидке прогнозування поширення пожеж	Оперативна оцінка ризиків для попередження пожеж	Висока точність моделювання; адаптивність до змін
2	Моніторинг стану лісових масивів	Збереження природних ресурсів	Інтерактивна система візуалізації даних
3	Аналіз впливу кліматичних факторів	Точні прогнози для різних сценаріїв	Інтеграція з екологічними моделями
4	Зменшення матеріальних та соціальних збитків	Зниження витрат на ліквідацію пожеж	Системний підхід до управління пожежною безпекою
5	Оцінка ризиків для страхових компаній	Обґрунтованість страхових тарифів	Надання спеціалізованих моделей для страхування
6	Освітні та навчальні цілі	Демонстрація динаміки пожеж	Простота використання; наявність навчальних модулів

Таблиця 5.10 визначає основні потреби цільової аудиторії, вигоди, які пропонує товар, та ключові переваги перед конкурентами. Підкреслюється, що стартап-проект орієнтований на забезпечення інноваційного та конкурентоспроможного продукту для задоволення актуальних потреб у сфері пожежної безпеки, екології, страхування та освіти.

У таблиці 5.11 наведено визначення меж встановлення ціни.

Таблиця 5.11. – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	6 000	11 000	23 000	2 000/8 000

Формування системи збуту ІТ-продукту – це комплекс дій та стратегій, спрямованих на оптимальну поставку продукту до кінцевого споживача або користувача. Ефективна система збуту грає важливу роль у успіху продукту на ринку. У таблиці 5.12 наведено формування системи збуту.

Таблиця 5.12 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Придбання програмного забезпечення	Реалізація	0 (напрям), 1 (через одного посередника)	Власна та через посередників

Таблиця 5.13 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п / п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
3	Потреба в аналітичних даних для прийняття рішень	Вебінари, інформаційні платформи	Точність прогнозів, інтегративність	Продемонструвати функціональність та вигоди	«Інструмент, що бачить майбутнє пожеж»
4	Прагнення до підвищення безпеки	Державні портали, звіти, презентації	Гарантія безпеки, соціальна відповідальність	Створити імідж надійного партнера	«Забезпечення безпеки для вас та вашого бізнесу»
6	Потреба у спеціалізованих навчальних матеріалах	Онлайн-курси, навчальні відео	Простота використання, навчальні можливості	Донести освітній потенціал	«Навчайтеся та захищайте разом із нами»
7	Пошук екологічно чистих рішень	Екологічні портали, партнерські проекти	Стійкість, екологічна орієнтованість	Стимулювати до участі в екологічних ініціативах	«Збережемо природу разом»

Таблиця 5.13 демонструє концепцію маркетингових комунікацій, спрямовану на залучення різних груп потенційних клієнтів. Вона враховує специфіку поведінки цільової аудиторії, ключові канали комунікацій, обрані позиції для позиціонування, завдання рекламних повідомлень і концепцію рекламних звернень. Це дозволяє ефективно адаптувати стратегію просування для кожного сегмента ринку.

Висновок до розділу

У цьому розділі було виконано всебічний аналіз та визначено основні аспекти розроблення стартап-проєкту, спрямованого на створення інноваційної системи математичного моделювання поширення лісових пожеж. Визначено об'єкт та предмет дослідження, а також сформульовано основну мету і завдання проєкту. Проаналізовано можливості реалізації стартап-проєкту з використанням сучасних технологій, таких як Python, Matplotlib, NumPy та інші інструменти для обчислень та візуалізації. Виконано маркетинговий аналіз ринкових умов, включаючи визначення ключових факторів загроз і можливостей, а також характеристику потенційних клієнтів. Сформовано концепцію цільових груп споживачів і визначено ключові переваги товару, серед яких інноваційність, висока точність прогнозів, зручність використання та екологічна значущість. Розроблено концепцію маркетингових комунікацій, яка охоплює канали взаємодії із цільовою аудиторією та підходи до позиціонування продукту. Проведено ступеневий аналіз конкурентного середовища, що дозволило визначити стратегії для збереження конкурентоспроможності.

Таким чином, розроблений стартап-проєкт є перспективним як з технічної, так і з економічної точок зору. Його реалізація сприятиме вирішенню важливої соціальної проблеми – підвищенню ефективності боротьби з лісовими пожежами, що, у свою чергу, позитивно вплине на екологічну ситуацію та економічну стабільність у регіонах.

ВИСНОВКИ

У ході виконання даного дипломного проєкту представлено математичну модель поширення лісових пожеж, розроблену на основі диференціальних рівнянь у частинних похідних. Модель враховує основні фізичні фактори, що впливають на динаміку пожежі, такі як вологість середовища, кількість палива, вплив вітру та теплопередача. Алгоритм моделювання реалізовано методом скінченних різниць, що забезпечує ефективний розрахунок процесів розповсюдження вогню в умовах неоднорідного середовища.

Для реалізації моделі використано сучасні наукові бібліотеки Python, зокрема NumPy, Matplotlib, SciPy, а також інтерактивні віджети ipywidgets для забезпечення зручності роботи користувача. Використання Google Colab як обчислювального середовища дало змогу швидко тестувати та візуалізувати результати моделювання.

Отримані результати дозволяють аналізувати поширення лісових пожеж залежно від заданих параметрів, зокрема розмірів сітки, коефіцієнта дифузії, швидкості вітру та рівня вологості. Інтерактивний інтерфейс забезпечує гнучкість налаштування моделі та відображення результатів у вигляді двовимірних зрізів і тривимірних графіків.

Розроблена система може бути використана для дослідження механізмів поширення лісових пожеж, оцінки їх потенційного впливу, а також для прийняття рішень щодо заходів із запобігання пожежам.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Товарянський В. І., Кузик А. Д. Дослідження пожежі молодих соснових насаджень // Пожежна безпека : зб. наук. праць. – Львів : Вид-во ЛДУ БЖД. – 2016. – № 28. – С. 113-120.
2. Математичне моделювання лісових пожеж. [Електронний ресурс] – 2018. – Режим доступу до ресурсу <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C>. Дата звернення 09.09.25.
3. Пустовіт М. О. Моделювання поширення пожежі всередині будівель у тривимірному просторі методом клітинних автоматів / М. О. Пустовіт // Системи управління, навігації та зв'язку. - 2013. - Вип. 1. - С. 164-168.
4. Кузик А.Д. Товарянський В.І., Математичне моделювання процесів кондуктивного і радіаційного теплообміну під час пожежі в соснових лісах. Пожежна безпека : зб. наук. праць. – Львів : Вид-во ЛДУ БЖД. – 2024. – № 30. – С.105-113.
5. В.В. Храмов, О.О. Судаков, М.В. Кононов, В.М. Устименко, М.М. Будник, Моделювання лісових пожеж на GRID-кластерах, Комп'ютерні засоби, мережі та системи. 2022, № 11. сс.47-57.
6. Weber R.O. Modelling spread through fuel beds. Progress in Energy and Combustion Science, 2021. – P. 17 – 67.
7. В.В. Храмов, О.О. Судаков, М.В. Кононов, В.М. Устименко, М.М. Будник, Моделювання лісових пожеж на GRID-кластерах, Комп'ютерні засоби, мережі та системи. 2022, № 11. сс.47-57.
8. HPE Haven OnDemand[Електронний ресурс] – 2015. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.havenondemand.com>. Дата звернення 09.09.25
9. Y-H Pao Adaptive pattern recognition and neural network / Yan Hwoo Pao – Boston: Addison-Wesley, 1989 – 164 p.
10. Toward Predictive [Електронний ресурс] – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://openreview.net/pdf?id=H1u8fMW0b>

11. The free-energy principle : a unified brain theory [Электронный ресурс] – 2020. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.nature.com/articles/nrn2787>. Дата звернення 09.09.25.
12. Fast multi-view face detection. In Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition. [Электронный ресурс] – 2023. – Режим доступа до ресурсу: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.145.7598>. Дата звернення 09.09.25.
13. Computational modelling of visual attention. Nature reviews neuroscience [Электронный ресурс] – 2021. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.nature.com/articles/35058500>. Дата звернення 08.09.25.

ДОДАТОК А

Код файлу fire_model.py проєкту

```
import numpy as np

def initialize_model(N, moisture_value=0.3):
    """
    Ініціалізація параметрів моделі.
    :param N: Розмір сітки (NxN).
    :param moisture_value: Початковий рівень вологості.
    :return: Ініціалізовані масиви для інтенсивності горіння, палива та вологості.
    """
    u = np.zeros((N, N)) # Інтенсивність горіння
    u[N // 2, N // 2] = 1 # Початкове займання в центрі
    fuel = np.ones((N, N)) # Кількість палива
    moisture = np.full((N, N), moisture_value) # Вологість
    return u, fuel, moisture

def simulate_fire(N, time_steps, dt, D, burn_rate, v_x, v_y, moisture_value=0.3):
    """
    Алгоритм моделювання поширення лісових пожеж.
    :param N: Розмір сітки.
    :param time_steps: Кількість часових кроків.
    :param dt: Часовий крок.
    :param D: Коефіцієнт дифузії.
    :param burn_rate: Швидкість вигорання палива.
    :param v_x: Компонента вітру по X.
    :param v_y: Компонента вітру по Y.
    :param moisture_value: Початковий рівень вологості.
    :return: Список масивів інтенсивності горіння на кожному часовому кроці.
    """
    dx = dy = 1.0
    u, fuel, moisture = initialize_model(N, moisture_value)
    results = []

    for t in range(time_steps):
        u_new = np.copy(u)
        # Дифузія
        laplacian = (
            np.roll(u, 1, axis=0) + np.roll(u, -1, axis=0) +
            np.roll(u, 1, axis=1) + np.roll(u, -1, axis=1) -
```

```

        4 * u
    ) / dx**2

    # Адвекція
    advection = -v_x * (np.roll(u, -1, axis=1) - np.roll(u, 1, axis=1)) / (2 * dx) \
                -v_y * (np.roll(u, -1, axis=0) - np.roll(u, 1, axis=0)) / (2 * dy)

    # Реакція
    reaction = u * (1 - moisture) * fuel - u**2

    # Оновлення інтенсивності горіння
    u_new += dt * (D * laplacian + advection + reaction)
    u_new = np.clip(u_new, 0, 1)

    # Оновлення кількості палива
    fuel = np.maximum(fuel - burn_rate * u * dt, 0)
    u = u_new
    results.append(u.copy())

return results

```

ДОДАТОК Б

Фрагмент коду файлу `visualization.py` проєкту

```
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
import plotly.graph_objects as go

def plot_2d_slice(data, time_step, N):
    """
    Побудова 2D-зрізу моделі для заданого часу.
    :param data: Результати моделювання.
    :param time_step: Часовий крок для візуалізації.
    :param N: Розмір сітки.
    """
    plt.imshow(data[time_step], cmap='hot', interpolation='nearest')
    plt.colorbar(label='Burning Intensity')
    plt.title(f"2D Slice at Time Step {time_step}")
    plt.show()

def plot_3d_surface(data, time_step, N):
    """
    Побудова 3D поверхні для заданого часу.
    :param data: Результати моделювання.
    :param time_step: Часовий крок для візуалізації.
    :param N: Розмір сітки.
    x = y = range(N)
    x, y = np.meshgrid(x, y)
    z = data[time_step]

    fig = plt.figure(figsize=(10, 8))
    ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
    ax.plot_surface(x, y, z, cmap='hot')
    ax.set_title(f"3D Surface at Time Step {time_step}")
    plt.show()

def animate_fire(data, interval=100):
    """
    Анімація поширення пожежі.
    :param data: Результати моделювання.
    :param interval: Інтервал між кадрами в мс.
    """
```

```

fig = go.Figure(
    frames=[
        go.Frame(
            data=go.Surface(z=data[t], colorscale='hot'),
            name=f"Frame {t}"
        ) for t in range(len(data))
    ]
)
fig.update_layout(
    scene=dict(zaxis=dict(range=[0, 1])),
    updatemenus=[dict(type='buttons', showactive=False, buttons=[
        dict(label='Play', method='animate', args=[None,
dict(frame=dict(duration=interval, redraw=True))]),
        dict(label='Pause', method='animate', args=[[None],
dict(frame=dict(duration=0, redraw=False))])
    ])]
)
fig.show()

```

ДОДАТОК В

Фрагмент код файлу `interface.ipynb` проекту

```
from ipywidgets import interact, FloatSlider, IntSlider
from fire_model import simulate_fire
from visualization import plot_2d_slice, plot_3d_surface, animate_fire

# Налаштування параметрів моделі
N = 50 # Розмір сітки
time_steps = 50
dt = 0.1
D = 2.0
burn_rate = 0.1
v_x, v_y = 0.5, 0.0

# Запуск моделі
results = simulate_fire(N, time_steps, dt, D, burn_rate, v_x, v_y)

# Інтерактивні елементи
def interactive_visualization(D=2.0, burn_rate=0.1, v_x=0.5, time_step=0):
    """
    Інтерактивна візуалізація моделі.
    """
    results = simulate_fire(N, time_steps, dt, D, burn_rate, v_x, v_y)
    plot_2d_slice(results, time_step, N)

interact(
    interactive_visualization,
    D=FloatSlider(value=2.0, min=0.1, max=5.0, step=0.1, description='Diffusion Coeff. '),
    burn_rate=FloatSlider(value=0.1, min=0.01, max=0.5, step=0.01, description='Burn
Rate'),
    v_x=FloatSlider(value=0.5, min=-1.0, max=1.0, step=0.1, description='Wind X'),
    time_step=IntSlider(value=0, min=0, max=time_steps - 1, step=1, description='Time
Step')
)
```

ДОДАТОК Г

Фрагмент код файлу `interface.ipynb` проєкту

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D

# Параметри моделі
N = 50 # Розмір сітки
dx = dy = 1.0 # Просторовий крок
dt = 0.1 # Часовий крок
D = 2.0 # Коефіцієнт дифузії
burn_rate = 0.1 # Швидкість вигорання
v_x, v_y = -1.0, 0.0 # Вітер дме на захід (Wind X = -1.0)
time_steps = 50 # Кількість часових кроків

# Функція для моделювання поширення пожежі
def simulate_forest_fire(N, D, burn_rate, v_x, v_y, time_steps):
    u = np.zeros((N, N)) # Інтенсивність горіння
    u[N // 2, N // 2] = 1 # Початкове займання

    fuel = np.ones((N, N)) # Кількість палива
    moisture = np.full((N, N), 0.3) # Вологість

    results = []
    for t in range(time_steps):
        u_new = np.copy(u)

        # Дифузія
        laplacian = (
            np.roll(u, 1, axis=0) + np.roll(u, -1, axis=0) +
            np.roll(u, 1, axis=1) + np.roll(u, -1, axis=1) -
            4 * u
        ) / dx**2
        # Адвекція
        advection = -v_x * (np.roll(u, -1, axis=1) - np.roll(u, 1, axis=1)) / (2 * dx) \
            - v_y * (np.roll(u, -1, axis=0) - np.roll(u, 1, axis=0)) / (2 * dy)
        # Реакція
        reaction = u * (1 - moisture) * fuel - u**2
```

```

    # Оновлення інтенсивності горіння
    u_new += dt * (D * laplacian + advection + reaction)
    u_new = np.clip(u_new, 0, 1)

    # Оновлення кількості палива
    fuel = np.maximum(fuel - burn_rate * u * dt, 0)

    u = u_new
    results.append(u.copy())

return results

# Моделювання
results = simulate_forest_fire(N, D, burn_rate, v_x, v_y, time_steps)

# Функція для побудови тривимірних графіків
def plot_3d_fire(results, time_step):
    u = results[time_step]
    x = np.linspace(0, N - 1, N)
    y = np.linspace(0, N - 1, N)
    X, Y = np.meshgrid(x, y)

    fig = plt.figure(figsize=(10, 8))
    ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
    ax.plot_surface(X, Y, u, cmap='hot', edgecolor='none')
    ax.set_title(f'3D Fire Spread at Time Step {time_step}')
    ax.set_xlabel('X Position')
    ax.set_ylabel('Y Position')
    ax.set_zlabel('Burning Intensity')
    plt.show()

# Побудова тривимірних графіків для обраних часових кроків
plot_3d_fire(results, time_step=10) # Ранній часовий крок
plot_3d_fire(results, time_step=30) # Середній часовий крок
plot_3d_fire(results, time_step=49) # Останній доступний часовий крок

```